

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DO PICO DA  
CURVA DE DEMANDA PARA CONSUMIDORES DE BAIXA  
RENDA POR AGREGAÇÃO DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Eng. JUAN PABLO DE LIMA COSTA SALAZAR**

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2004

**ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DO PICO DA CURVA DE  
DEMANDA PARA CONSUMIDORES DE BAIXA RENDA POR  
AGREGAÇÃO DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA**

**Eng. JUAN PABLO DE LIMA COSTA SALAZAR**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE

**MESTRE EM ENGENHARIA**

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CIÊNCIAS TÉRMICAS

E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA

---

**Prof. SERGIO COLLE, D. Sc.**  
ORIENTADOR

---

**SAMUEL LUNA DE ABREU, Dr.**  
CO-ORIENTADOR

---

**Prof. JOSÉ ANTÔNIO BELLINI DA CUNHA NETO, Dr.**  
COORDENADOR DO CURSO

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. JÚLIO CÉSAR PASSOS, Dr.**  
PRESIDENTE

---

**Prof. AMIR ANTÔNIO MARTINS DE OLIVEIRA JÚNIOR, Ph. D.**

---

**Prof. THOMAZ PENTEADO DE FREITAS BORGES, Dr.**

**“There is no royal road to science, and only those who do not dread the fatiguing climb of its steep paths have a chance of gaining its luminous summits.”**

**Karl Marx**

## Agradecimentos

A realização deste trabalho somente foi possível graças ao financiamento das Centrais Elétricas de Santa Catarina, S.A., à Caixa Econômica Federal, que permitiu a intervenção no Condomínio Residencial Solar Buona Vita, aos moradores desse condomínio, por permitirem a instalação de equipamentos em suas residências e à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudo concedida para a realização do mestrado.

A Samuel Luna de Abreu, pelas contribuições à dissertação e pelo trabalho dedicado ao projeto de pesquisa e desenvolvimento, ao Prof. Sergio Colle, pela dedicação à pesquisa e por me convidar para participar dessa empreitada e a Thomaz Penteado Freitas Borges, pela contribuição importante no que se refere à otimização econômica.

Gostaria aqui também de agradecer ao colega de mestrado Márcio Alexandre Cano Miranda, pela amizade pessoal e profissional, aos colegas do Labsolar, Julio Nelson Scussel e Humberto Vidal Gutiérrez, pelo convívio sempre harmonioso e também ao bolsista de iniciação científica Pedro Henrique Marques Sincero pelo tratamento eficiente dos dados de medição *in situ* e pela ajuda na coleta dos mesmos.

Especial agradecimento ao apoio da amiga Laylla Donata Cardoso, principalmente na fase final do trabalho, por oferecer um ombro amigo em momentos difíceis.

À Sonia Elena Alvarez, por me mostrar a virtuosidade da vida acadêmica e por me ajudar a não perder o foco do objetivo maior da minha vida.

A todos os professores que me inspiraram e continuam a me inspirar, com menção especial ao Prof. Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior e ao Prof. Álvaro Toubes Prata.

Ao meu avô, Álvaro José de Lima Costa, por me mostrar, desde pequeno, o valor da cultura e do conhecimento.

Finalmente, a minha mãe, Claudia Junqueira de Lima Costa, pela inspiração acadêmica, cobrança, incentivo, educação e pelo amor incondicional.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS E TABELAS</b>	<b>VI</b>
<b>SIMBOLOGIA</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMO</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
2.1 GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA	6
2.2 ESTRATÉGIAS DE GLD PARA CONSUMO DE ÁGUA QUENTE	11
2.3 CONSUMO DE ÁGUA QUENTE	24
2.4 SOFTWARE DE SIMULAÇÃO	26
2.4.1 “ <i>A Transient System Simulation Program (TRNSYS)</i> ”	26
2.4.2 “ <i>Generic Optimization Program (GenOpt)</i> ”	28
<b>3 VALIDAÇÃO DO MODELO DO COLETOR SOLAR COM RESERVATÓRIO TÉRMICO INTEGRADO</b>	<b>29</b>
3.1 SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA POR CIRCUITO TERMOSSIFÃO	29
3.2 MODELO DO COLETOR SOLAR COM RESERVATÓRIO TÉRMICO INTEGRADO DO TRNSYS	35
3.2.1 <i>Desempenho térmico do coletor e o ganho-termossifão</i>	39
3.2.2 <i>Modelo de Reservatório Térmico Plug-Flow</i>	42
3.2.3 <i>Procedimento de solução</i>	45
3.3 SISTEMAS PERIFÉRICOS	47
3.3.1 <i>Cálculo da irradiação solar incidente em plano inclinado</i>	47
3.3.2 <i>Sistema auxiliar de aquecimento de passagem</i>	48
3.3.3 <i>Curva de Demanda</i>	49
3.3.4 <i>Sistema de Mistura</i>	49
3.3.5 <i>Tubulação</i>	49
3.4 METODOLOGIA DE VALIDAÇÃO	49
3.5 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR E DA BANCADA EXPERIMENTAL	53
3.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
<b>4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA MEDIÇÃO <i>IN SITU</i></b>	<b>65</b>
4.1 METODOLOGIA	65
4.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	67
<b>5 OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DE PARÂMETROS CONSTRUTIVOS</b>	<b>82</b>
5.1 TRABALHOS ANTERIORES DE OTIMIZAÇÃO COM TRNSYS	82
5.2 CUSTO DO CICLO DE VIDA ANUALIZADO ( <i>ALCC</i> ) APLICADO AO PAR DA CAIXA	83
5.3 A CURVA DE COMPROMISSO OU CURVA DE TRADEOFF	85
5.4 METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO	90
5.5 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA SIMULADO	94
5.6 PERFIL DE CONSUMO DE ÁGUA QUENTE	97
5.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>105</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO A - CÁLCULO DO COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO RESERVATÓRIO TÉRMICO</b>	<b>114</b>
<b>ANEXO B – DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE SELEÇÃO DOS CONSUMIDORES</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO C – DADOS ESTATÍSTICOS DAS CURVAS DE CALIBRAÇÃO</b>	<b>123</b>

## Lista de Figuras e Tabelas

### Figuras

Fig. 1.1 Curva de demanda desagregada por tipo de consumidor para o dia de demanda típico do ano de 2003 na região de concessão da CELESC (CELESC, 2004).	1
Fig. 1.2 Esquema do coletor solar compacto	5
Fig. 2.1 Técnicas para alterar a forma da curva de carga. Adaptado de Bellarmine & Turner, 1994.	8
Fig. 2.2 Evolução dos gastos e respectivas economias obtidas com os programas de GLD de 1990 a 2000 nos EUA (EIA, 2004).	9
Fig. 2.3 Pré-aquecedor solar (Oliva & Borges, 1996).	12
Fig. 2.4 Fração solar dos diferentes sistemas de aquecimento solar (Abreu, 2000).	15
Fig. 2.5 LCS para o estado de Santa Catarina – coletor tradicional -1,35m <sup>2</sup> , custo total – R\$750,00, vida útil – 20 anos (Abreu, 2000).	17
Fig. 2.6 Sistema de aquecimento solar modelado no IISiBat	27
Fig. 3.1 Diagrama mostrando um circuito termossifão e a distribuição hipotética de temperatura	30
Fig. 3.2 Método de solução do modelo de reservatório térmico <i>plug-flow</i> (Morrison & Braun, 1985).	43
Fig. 3.3 Coletor solar usado na validação experimental. Fabricante: Solares LTDA.	53
Fig. 3.4 Temperaturas e irradiação global em plano inclinado para o primeiro período de validação	58
Fig. 3.5 Temperaturas e irradiação global em plano inclinado para o segundo período de validação	59
Fig. 3.6 Temperaturas e irradiação global em plano inclinado para o terceiro período de validação	60
Fig. 3.7 Variação de energia do reservatório térmico para o primeiro período de validação	62
Fig. 3.8 Variação de energia do reservatório térmico para o segundo período de validação	63
Fig. 3.9 Variação de energia do reservatório térmico para o terceiro período de validação	63
Fig. 4.1 Consumo médio mensal por horário dos dias úteis do mês de abril de 2004.	68
Fig. 4.2 Consumo médio mensal por horário dos finais de semana e feriados do mês de abril de 2004.	68
Fig. 4.3 Consumo médio mensal por horário de todos os dias do mês de abril (dia padrão médio) de 2004.	69
Fig. 4.4 Consumo médio mensal por horário dos chuveiros elétricos em fevereiro de 2004	70
Fig. 4.5 Consumo médio mensal por horário dos chuveiros elétricos em março de 2004	70
Fig. 4.6 Consumo médio mensal por horário dos chuveiros elétricos em abril de 2004	71
Fig. 4.7 Consumo médio mensal por horário dos chuveiros elétricos em maio de 2004	71
Fig. 4.8 Demanda média no dia de pico máximo do mês de fevereiro de 2004	73
Fig. 4.9 Demanda média no dia de pico máximo do mês de março de 2004	74
Fig. 4.10 Demanda média no dia de pico máximo do mês de abril de 2004	75
Fig. 4.11 Demanda média no dia de pico máximo do mês de maio de 2004	76
Fig. 4.12 Consumo médio mensal por horário do perfil matutino	79
Fig. 4.13 Consumo médio mensal por horário do perfil vespertino	79
Fig. 4.14 Consumo médio mensal por horário do perfil noturno	80
Fig. 5.1 Curva de compromisso ou curva de <i>tradeoff</i> genérica	86
Fig. 5.2 Curva de compromisso hipotética do custo do ciclo de vida anualizado versus o consumo anual de energia no horário de ponta (Borges & Colle, 2004).	87
Fig. 5.3 Exemplo hipotético das curvas $ALCC$ , $CST_C$ e $CT_C$	88
Fig. 5.4 Esquema de otimização acoplando os programas TRNSYS e GenOpt.	90
Fig. 5.5 Perfil de consumo de água quente usado na otimização.	98
Fig. 5.6 Curva de compromisso obtida com a otimização	99
Fig. 5.7 Valores normalizados das variáveis otimizadas para a obtenção da curva de compromisso.	101
Fig. 5.8 Razão entre o volume do reservatório térmico e a área de placa coletora para os valores de $\phi$ .	103
Fig. 5.9 Valor da sobretaxa cobrada pelo consumo durante o horário de ponta.	104

## Tabelas

Tab. 1.1 Participação de diferentes usos no consumo residencial de energia elétrica por região. (Almeida <i>et al.</i> , 2001)	2
Tab. 1.2 Demanda média de energia elétrica por consumidor residencial no horário de ponta (1900h) por faixa de consumo mensal. (Jannuzzi, 1989).	2
Tab. 2.1 Resultados das ações do Procel no período 1994-2003 (PROCEL, 2004)	10
Tab. 2.2 Características técnicas do pré-aquecedor solar (Oliva & Borges, 1996)	12
Tab. 2.3 Consumo Médio Mensal de Energia Elétrica por residência – Pereira <i>et al.</i> (2003)	18
Tab. 2.4 Contribuição das medidas de conservação sobre o consumo total e sobre o consumo no horário de ponta - prognóstico para 2020, cenário Técnico (Almeida <i>et al.</i> , 2001).	21
Tab. 3.1 Coeficientes de brilho para o modelo anisotrópico de Perez <i>et al.</i> (1988).	48
Tab. 3.2 Grandezas validadas no modelo do coletor solar com reservatório térmico integrado do TRNSYS	50
Tab. 3.3 Variáveis medidas com os respectivos intervalos de aquisição e intervalos de média.	51
Tab. 3.4 Programação da retirada de água quente do sistema de aquecimento solar	52
Tab. 3.5 Parâmetros construtivos e operacionais do coletor solar e reservatório térmico	54
Tab. 3.6 Parâmetros de validação para as variáveis analisadas e os três períodos de validação	64
Tab. 4.1 Número de consumidores usados para obtenção de resultados de fevereiro a maio de 2004	66
Tab. 4.2 Tipos de perfis de consumo de água quente e seus respectivos períodos característicos	67
Tab. 4.3 Fator carga do consumo médio mensal de energia dos chuveiros elétricos para os meses de fevereiro a maio de 2004	72
Tab. 4.4 Fração solar estimada, temperatura média mensal e média mensal de irradiação global em plano horizontal para os meses de fevereiro a abril de 2004.	77
Tab. 4.5 Percentual do consumo de energia elétrica residencial atribuído ao chuveiro elétrico para os grupos A e B de fevereiro a maio de 2004.	78
Tab. 4.6 Percentual dos perfis de consumo de água quente do grupo B de 02/2004 a 05/2004.	78
Tab. 4.7 Percentual dos perfis de consumo de água quente do grupo A de 02/2004 a 05/2004.	80
Tab. 5.1 Conjunto de variáveis otimizadas	91
Tab. 5.2 Parâmetros adotados do algoritmo de otimização <i>Hybrid Generalized Pattern Search Algorithm with Particle Swarm Optimization Algorithm</i>	93
Tab. 5.3 Parâmetros adotados da implementação GPS do algoritmo Hook-Jeeves	94
Tab. 5.4 Parâmetros adotados do algoritmo Simplex de Nelder e Mead com a extensão de O'Neill	94
Tab. 5.5 Modelagem da dependência dos parâmetros do sistema de aquecimento com as variáveis otimizadas	95
Tab. 5.6 Parâmetros construtivos e operacionais do coletor solar e reservatório térmico	96
Tab. 5.7 Parâmetros econômicos adotados.	97
Tab. 5.8 Coeficientes do ajuste com decaimento exponencial de terceira ordem	100
Tab. 5.9 Valores reais das variáveis otimizadas para a obtenção da curva de compromisso.	101
Tab. B.1 Critérios de Classificação, Valores de Referência e Pesos	121

## Simbologia

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$A$	Área	$[m^2]$
$ALCC$	Custo anualizado do ciclo de vida	US\$/ano
$b_0$	Coefficiente de modificação do ângulo de incidência	[-]
$c_P$	Calor específico a pressão constante	$[kJ/kgK]$
$C$	Capacitância térmica	$[J/K]$
$CCD$	Coefficiente de conservação da demanda	[-]
$CO$	Custo operacional	US\$
$C_S$	Custo inicial do sistema	US\$
$C_A$	Custo unitário da área de coletor	US\$/m <sup>2</sup>
$C_{A-RT}$	Custo unitário de área do reservatório térmico	US\$/m <sup>2</sup>
$C_E$	Custos de instalação	US\$
$C_P$	Custo por unidade de potência do resistor de aquecimento auxiliar no reservatório térmico	US\$/(kJ/h)
$C_I$	Custo unitário de volume de isolamento	US\$/m <sup>3</sup>
$CST_C$	Custo anual de consumo do consumidor devido à sobretaxa imposta	US\$/ano
$D, d$	Diâmetro, taxa de desconto	$[m], [-]$
$E$	Energia	$[kJ]$
$E_{HP}$	Consumo anual no horário de ponta	$[kWh]$
$EF$	Energia “faltante”	$[kWh]$
$f$	Fração solar	[-]
$f^*$	Fração solar estimada	[-]
$f_D$	Fator de fricção de Darcy	[-]
$f_D^*$	Fator de fricção de Darcy para escoamento não-desenvolvido	[-]
$F'$	Fator de eficiência de aleta do coletor	[-]
$F_1$	Coefficiente de brilho circumsolar	[-]
$F_2$	Coefficiente de brilho do horizonte	[-]
$F_R$	Fator de remoção de calor do coletor	[-]
$F_R(\tau\alpha)_n$	Coefficiente linear da curva de rendimento do coletor	[-]
$g$	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
$G$	Irradiação global incidente	$[W/m^2]$
$G_{teste}$	Vazão mássica por área de coletor usada para obtenção da curva de rendimento	$(kg/h)/m^2$
$h, H$	Alturas	$[m]$
$h_f$	Altura manométrica da coluna de água cuja pressão equivale à perda de carga por fricção	$[m]$
$h_T$	Ganho-termossifão	$[m]$
$I$	Irradiação solar incidente	$[W/m^2]$
$i_F$	Inflação da energia elétrica	[-]
$i_{TA}$	Inflação da taxa de arrendamento	[-]
$i_M$	Inflação da taxa de manutenção	[-]
$k$	Coefficiente de perda de carga localizada	[-]

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$k_w$	Coeficiente de condutividade térmica do fluido no reservatório	[(kJ/h)/mK]
$L$	Comprimento	[m]
$LCC$	Custo do ciclo de vida	US\$
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
$N_x$	Número de nós usados para simular o coletor	[-]
$N_E$	Período da análise econômica	Anos
$NB$	Número de joelhos	[-]
$P$	Pressão	[Pa]
$PWF$	Fator de valor presente	[-]
$Q$	Energia	[kWh]
$\dot{Q}_C$	Taxa de calor absorvido no coletor	[W]
$\dot{Q}_{LC}$	Taxa de perdas do coletor para o ambiente	[W]
$\dot{Q}_{LT}$	Taxa de perda de calor do reservatório térmico para o ambiente	[W]
$\dot{q}_u$	Taxa de calor útil por unidade de comprimento na direção do fluxo entregue ao fluido de trabalho	[W/m]
$Re$	Número de Reynolds	[-]
$r_{TA}$	Razão entre taxa de arrendamento paga anualmente e o custo total do sistema	[-]
$r_M$	Razão entre os custos de manutenção do primeiro ano e o custo inicial do sistema	[-]
$r_i$	Razão entre a espessura de isolamento entre a superfície superior e a inferior do reservatório térmico	[-]
$R_b$	Razão entre a irradiação solar direta em plano inclinado e no plano horizontal	[-]
$R^2$	Coeficiente de determinação	[-]
$S$	Densidade específica, irradiação solar absorvida por unidade de área	[-],[W/m <sup>2</sup> ]
$ST_{HP}$	Sobretaxa a ser cobrada pela concessionária de energia elétrica pelo consumo de energia no horário de ponta	US\$/kWh
$t$	Tempo	[h]
$T$	Temperatura	[K]
$\Delta T_{db}$	Histerese do termostato	[K]
$U$	Coeficiente de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> K]
$(UA)$	Coeficiente global de transferência de calor	[W/K]
$V$	Velocidade média, Volume	[m/s], [m <sup>3</sup> ]
$W$	largura da placa coletora	[m]

### Letras gregas

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\alpha$	Absorptividade da placa do coletor	[-]
$\beta$	Ângulo de inclinação do coletor solar em relação à horizontal	[°]
$\gamma$	Variável de controle que determina o horário de ponta	[-]

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\Delta$	Varição, brilho	[-]
$\phi$	Parâmetro de controle da função multiobjetivo	[-]
$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_g$	Albedo do solo	[-]
$\tau$	Transmissividade da cobertura do coletor	[-]
$\theta$	ângulo de azimute	[°]

### Subscritos

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
<i>a</i>	Ambiente
<i>AUX</i>	Auxiliar
<i>b</i>	Direta, direção de incidência da radiação direta
<i>c</i>	Coletor
<i>CE</i>	Chuveiro elétrico
<i>d</i>	Irradiação difusa do céu
<i>D</i>	Diâmetro, consumo
<i>e</i>	Efetivo
<i>ex</i>	Experimental
<i>f</i>	Fluido, fricção
<i>g</i>	Irradiação difusa refletida pela superfície terrestre e à direção de incidência dessa radiação
<i>H</i>	Cabeçote
<i>HP</i>	Horário de ponta
<i>i</i>	Entrada, inicial
<i>I</i>	Isolamento
<i>L</i>	Perda
<i>MAX</i>	Máximo
<i>MIN</i>	Mínimo
<i>n</i>	Direção normal
<i>o</i>	Saída
<i>p</i>	Tubo
<i>R</i>	Ascensor, retorno
<i>RT</i>	Reservatório térmico
<i>s</i>	Direção de incidência da radiação difusa do céu
<i>si</i>	Simulado
<i>SET</i>	Ajuste
<i>T</i>	Plano inclinado
<i>Th</i>	Termostato
<i>z</i>	Zênite

## Resumo

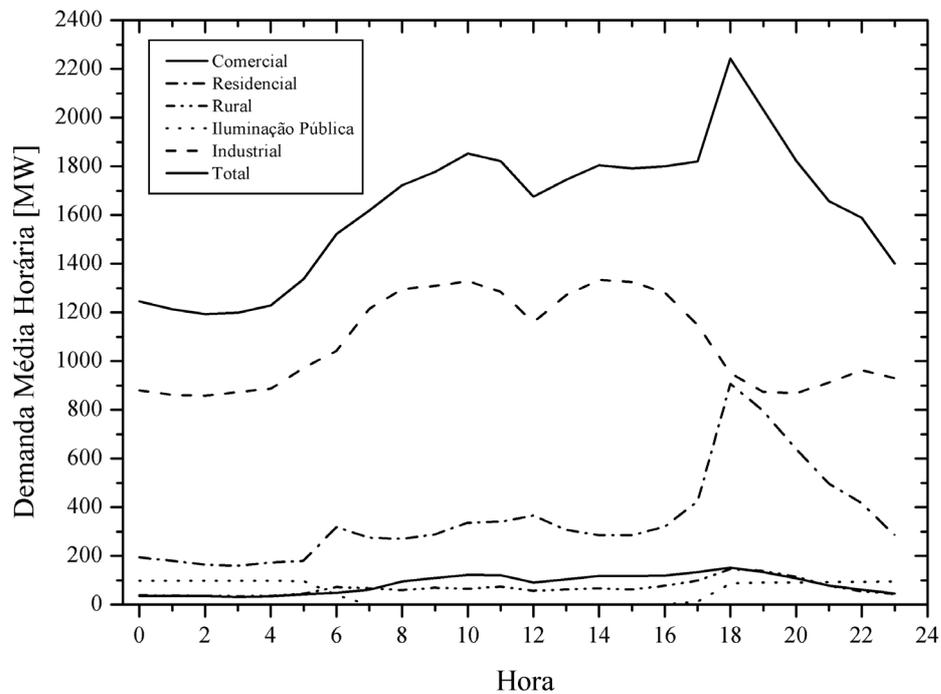
O objetivo principal do trabalho foi o estabelecimento de uma metodologia de levantamento do potencial de economia e redução no pico da curva de demanda de energia elétrica no horário de ponta para consumidores de baixa renda, através do uso de sistemas de aquecimento solar compactos (com reservatório térmico integrado à placa coletora). Com o objetivo de quantificar esse potencial, um conjunto de 90 consumidores de baixa-renda, moradores de um condomínio residencial do Programa de Arrendamento Residencial da Caixa Econômica Federal, foi selecionado para ter o consumo de energia do chuveiro elétrico monitorado. A partir dos dados coletados, foi possível levantar informações relevantes para políticas de conservação de energia, como a distribuição horária do consumo de água quente, a contribuição do aquecimento de água para o consumo de energia elétrica residencial, a contribuição do chuveiro elétrico para o pico da curva de demanda, além da fração solar estimada do conjunto de residências. Paralelamente, realizou-se a validação de um modelo computacional de um sistema de aquecimento solar com reservatório térmico integrado para o software comercial TRNSYS (*Transient System Simulation Program*), com o objetivo de aumentar a credibilidade dos resultados apresentados obtidos mediante a extrapolação do consumo anual através de simulações. Uma revisão dos modelos de circuito termossifão é também apresentada. Com base em um perfil de consumo de água quente derivado a partir dos dados de medição *in situ*, faz-se uma otimização econômica de parâmetros construtivos através da programação multiobjetivo, levando em consideração o interesse do arrendatário e também o da concessionária de energia elétrica. Em um estudo de caso, a metodologia adotada fornece o valor da sobretaxa a ser cobrada pelo consumo de energia elétrica durante o horário de ponta em uma possível adoção de tarifa residencial diferenciada, além de dimensionar o sistema para um conjunto de consumidores com diferentes perfis de consumo de água quente. Os resultados apresentados neste trabalho são importantes para a determinação da viabilidade de políticas públicas para incorporação de sistemas de aquecimento solar às plantas de moradia para a população de baixa renda.

## Abstract

The main objective of the present work is to establish a methodology capable of assessing, through the use of a compact thermosyphon solar hot water heating system, the energy saving and electric energy peak reduction potential during the peak hours for a group of low-income residential consumers. In order to quantify these potentials, a total of 90 low-income consumers were chosen to have their electric energy consumption monitored. Analysis of the collected data rendered relevant information for energy conservation policies, such as the hourly distribution of hot water consumption, the fraction of the electric energy consumption used for water heating, the average contribution of electric showerheads to the peak demand, and the estimated solar fraction for the group of consumers. The validation of the TRNSYS (Transient System Simulation Program) computational code for a thermosyphon solar water heating system is undertaken. The multi-objective economic optimization of constructive parameters, with use of an average hot water consumption profile obtained from measured data, is also presented. In a case study, the result of the adopted methodology is the extra tariff value for energy consumption during peak hours in a differentiated tariff scenario. The results presented in this work are relevant to determine the viability of government policies towards promotion of the large-scale use of solar hot water heating systems in low – income housing units.

# 1 Introdução

A curva de demanda de energia elétrica é caracterizada por um pico pronunciado em torno das 18h, como pode ser visto na Fig. 1.1, a curva de demanda típica para o ano de 2003 (CELESC, 2004). Em função da tarifa diferenciada na indústria, o consumo de energia elétrica é inibido no horário de ponta, mediante uso de gestão adequada. Assim, o pico da curva de demanda é atribuído exclusivamente ao setor residencial. Segundo estudo feito em 1987 (Jannuzzi e Schipper, 1991), o aquecimento de água é o responsável por 23% da energia elétrica consumida no setor residencial, atrás apenas da contribuição dos refrigeradores (33%). Ainda, segundo o mesmo estudo, a penetração do chuveiro elétrico é de aproximadamente 70% das residências eletrificadas, constituindo-se no principal equipamento usado para aquecimento de água. Isso se deve ao fato do chuveiro elétrico ter um preço acessível e não requerer a instalação de tubulação de água quente ou de um reservatório térmico, além dos investimentos feitos em usinas hidrelétricas no Brasil nas últimas décadas, que reduziram o preço da energia elétrica para o consumidor final (Prado e Gonçalves, 1998). Valores para a participação dos principais usos no consumo de energia elétrica residencial por região do Brasil são mostrados na Tab. 1.1.



**Fig. 1.1** Curva de demanda desagregada por tipo de consumidor para o dia de demanda típico do ano de 2003 na região de concessão da CELESC (CELESC, 2004).

**Tab. 1.1 Participação de diferentes usos no consumo residencial de energia elétrica por região. (Almeida *et al.*, 2001)**

Região	Refrigeração [%]	Aquecimento de Água [%]	Iluminação [%]	Ar Condicionado [%]	Outros [%]
Sudeste	33,1	23,4	11,2	3,3	29,0
Sul	32,6	22,4	10,9	1,5	32,7
Norte	35,4	4,5	19,6	9,4	31,1
Nordeste	41,0	7,2	18,2	3,1	30,5
Centro-Oeste	33,6	23,2	12,1	2,3	28,9
Brazil	34,1	20,7	12,3	3,0	29,9

O uso dos chuveiros elétricos coincide com o pico da curva de demanda do sistema elétrico, além de ser um equipamento que possui elevada potência e período reduzido de uso (baixo fator de carga<sup>1</sup>), tornando o chuveiro elétrico importante para as políticas de conservação de energia (Prado e Gonçalves, 1998; Geller *et al.*, 1998; Oliva e Borges, 1996). Um estudo sobre o consumo residencial de energia elétrica na cidade de São Paulo (Jannuzzi, 1989) identificou a demanda média por consumidor residencial (em watt) por faixa de consumo mensal durante o horário de ponta (19:00h), de acordo com a Tab. 1.2.

**Tab. 1.2 Demanda média de energia elétrica por consumidor residencial no horário de ponta (1900h) por faixa de consumo mensal. (Jannuzzi, 1989).**

Consumo Mensal [kWh]	Inverno [W]	Verão [W]
0-30	202	153
31-200	510	405
201-500	1032	871
501-1000	1935	1739
>1000	3746	3434

A participação do chuveiro elétrico durante o horário de ponta em cada faixa de consumo é variável, sendo maior nas faixas intermediárias de consumo. Matajs (1997) estimou o investimento em geração por chuveiro elétrico de 4,2 kW durante o horário de

<sup>1</sup> O fator de carga é definido como a razão entre a demanda média e máxima de um determinado período. Baixos fatores de carga significam demandas mais regulares, de interesse das concessionárias de energia elétrica.

ponta em US\$ 588. Para isso ele usou um valor de custo marginal de potência instalada de US\$ 2150 por kilowatt. Geller *et al.* (1998) mencionam investimentos necessários pelas concessionárias por chuveiro elétrico da ordem de US\$ 800-1000, porém, não são fornecidas informações adicionais quanto à classe de consumidor.

No setor residencial, o consumo de energia elétrica é composto principalmente por refrigeração, aquecimento de água e iluminação, nessa ordem (Geller *et al.*, 1998; Almeida *et al.*, 2001). O aproveitamento da energia solar para o aquecimento de água apresenta-se como alternativa para a economia global de energia e também para a redução do pico da curva de demanda, quando o consumo de água ocorre no horário de ponta. Com a finalidade de quantificar esses potenciais, um conjunto de 90 famílias de baixa-renda, moradoras de um condomínio residencial do Programa de Arrendamento Residencial (PAR) da Caixa Econômica Federal (CAIXA), foi selecionado para ter o consumo de energia elétrica monitorado. Destes, 60 receberam um sistema de aquecimento solar compacto e chuveiro elétrico com ajuste contínuo de potência. As outras 30 famílias, que serviram como grupo de referência, receberam apenas o chuveiro com ajuste contínuo de potência. A partir dos dados coletados, foi possível levantar informações adicionais relevantes para políticas de conservação de energia, como a distribuição horária do consumo de água quente, a contribuição do aquecimento de água para o consumo de energia elétrica residencial, a contribuição do chuveiro elétrico para o pico da curva de demanda, além da fração solar do conjunto de residências. Os resultados obtidos com este projeto piloto não podem ser automaticamente estendidos a outras regiões do país em função da dependência climatológica dos sistemas de aquecimento solar e das variações regionais dos hábitos de consumo de água quente. Não obstante, através da validação de um modelo computacional para um sistema de aquecimento solar compacto de fabricação nacional, juntamente com dados meteorológicos de outras regiões e perfis de consumo de água quente medidos, é possível obter estimativas seguras do impacto do uso de sistemas de aquecimento solar sobre as variáveis de interesse (consumo total de energia e demanda no horário de ponta) para as regiões do país onde estes dados estiverem disponíveis.

No presente trabalho, a validação de um modelo computacional de um sistema de aquecimento solar compacto para o software comercial TRNSYS - *Transient Simulation Program* (TRNSYS, 2000) é realizada. Com base em diferentes perfis de consumo de água quente, derivados a partir dos dados de medição *in situ*, faz-se uma otimização econômica de parâmetros construtivos através da programação multiobjetivo, levando em consideração o

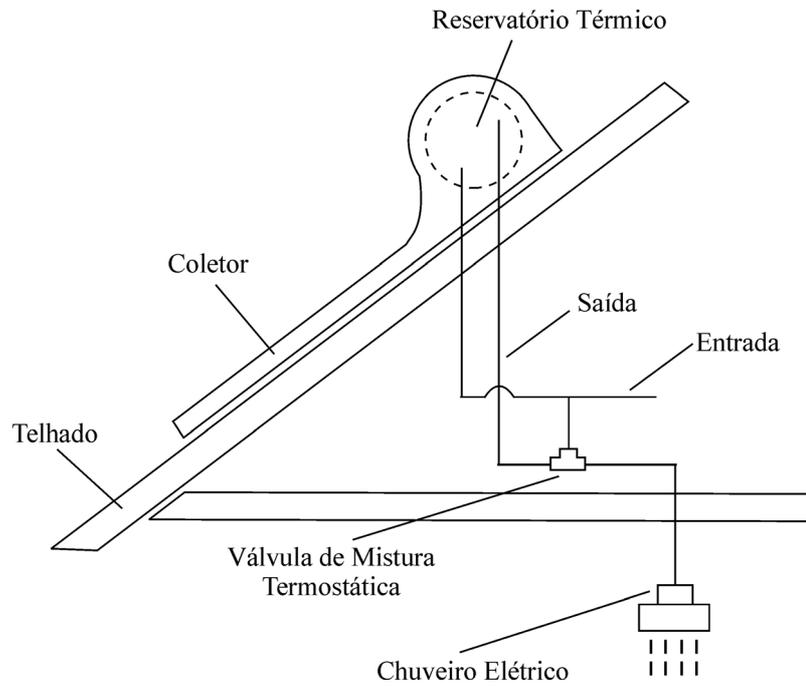
interesse do arrendatário e também da concessionária de energia elétrica. A metodologia adotada fornece o valor da sobretaxa a ser cobrada pelo consumo de energia elétrica durante o horário de ponta em um possível cenário de adoção de tarifa horária residencial diferenciada.

Os resultados apresentados neste trabalho são importantes para a determinação da viabilidade de políticas públicas para a incorporação de sistemas de aquecimento solar ao projeto de moradias para a população de baixa renda.

O presente trabalho tem como objetivo principal o estabelecimento de uma metodologia de levantamento do potencial de economia e redução no pico da curva de demanda de energia elétrica no horário de ponta para consumidores de baixa renda, através do uso de sistemas de aquecimento solar compactos (com reservatório térmico integrado à placa coletora). O trabalho está inserido dentro do contexto de um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento financiado pelas Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), de acordo com a Lei nº 9.991, de 24 de Julho de 2000, pela qual a concessionária de energia elétrica é obrigada a aplicar anualmente o montante de no mínimo 0,25 % de sua receita operacional líquida em ações que tenham por objetivo o combate ao desperdício de energia elétrica.

O sistema de aquecimento solar compacto usado é composto por um coletor com cobertura única de vidro simples acoplado a um reservatório térmico, localizado imediatamente acima do coletor, como pode ser visto na Fig. 1.2, e equipado com resistor para aquecimento (inicialmente desativado). O sistema pode ser facilmente montado sobre o telhado e conectado com a tubulação de água quente. Um chuveiro elétrico com regulagem eletrônica de potência funciona como fonte de energia auxiliar. Uma válvula de mistura termostática limita a temperatura máxima de fornecimento de água quente para o chuveiro elétrico com o objetivo de prevenir queimaduras, além de evitar o consumo excessivo de água quente.

Nos capítulos seguintes são apresentados a revisão bibliográfica dos trabalhos anteriores mais relevantes ao tema, a validação do modelo do coletor solar do TRNSYS, os resultados da medição *in situ*, a otimização econômica dos parâmetros construtivos e as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.



**Fig. 1.2 Esquema do coletor solar compacto**

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo o conceito de gerenciamento pelo lado da demanda é apresentado, para então abordar as principais medidas realizadas no Brasil. Em seguida são apresentados estudos anteriores existentes na literatura, de quantificação do impacto de sistemas de aquecimento solar e outras medidas de conservação de energia sobre a economia de energia elétrica e/ou a redução do pico da curva de demanda. A literatura recente sobre hábitos de consumo de água quente e meios usados para estimá-lo é discutida. Finalmente, faz-se uma descrição dos programas computacionais usados neste trabalho.

### 2.1 Gerenciamento pelo lado da demanda

O gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), pode ser definido como qualquer iniciativa por parte da concessionária, com cooperação e consentimento do consumidor, que o atenda essencialmente com o mesmo nível de serviços de energia, contudo, a custos totais menores (Sioshansi, 1992). Isto pode ser conseguido através da melhoria da eficiência energética em máquinas, equipamentos e instalações, acarretando um consumo energético menor, ou através do deslocamento de parte do consumo do horário de ponta para fora da ponta. A segunda opção pode ser acompanhada de um aumento do consumo total de energia, porém a um custo menor de fornecimento por parte da concessionária. Políticas de conservação de energia devem procurar reduzir o consumo energético dos aparelhos eletrodomésticos, assim como a contribuição destes no pico da curva de carga (Jannuzzi & Schipper, 1991).

O objetivo final das ações de GLD é a alteração da forma da curva de carga das concessionárias de modo a economizar na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Os principais métodos conhecidos são abordados a seguir (Bellarmine & Turner, 1994) e ilustrados na Fig. 2.1.

- Corte de ponta: O controle direto de carga e a tarifação horária são usados para reduzir a demanda durante o período de ponta. Este efeito pode reduzir os custos da concessionária, na medida em que a necessidade de operar suas unidades de geração mais caras é reduzida e também por postergar investimentos na expansão da capacidade de geração, transmissão e distribuição.

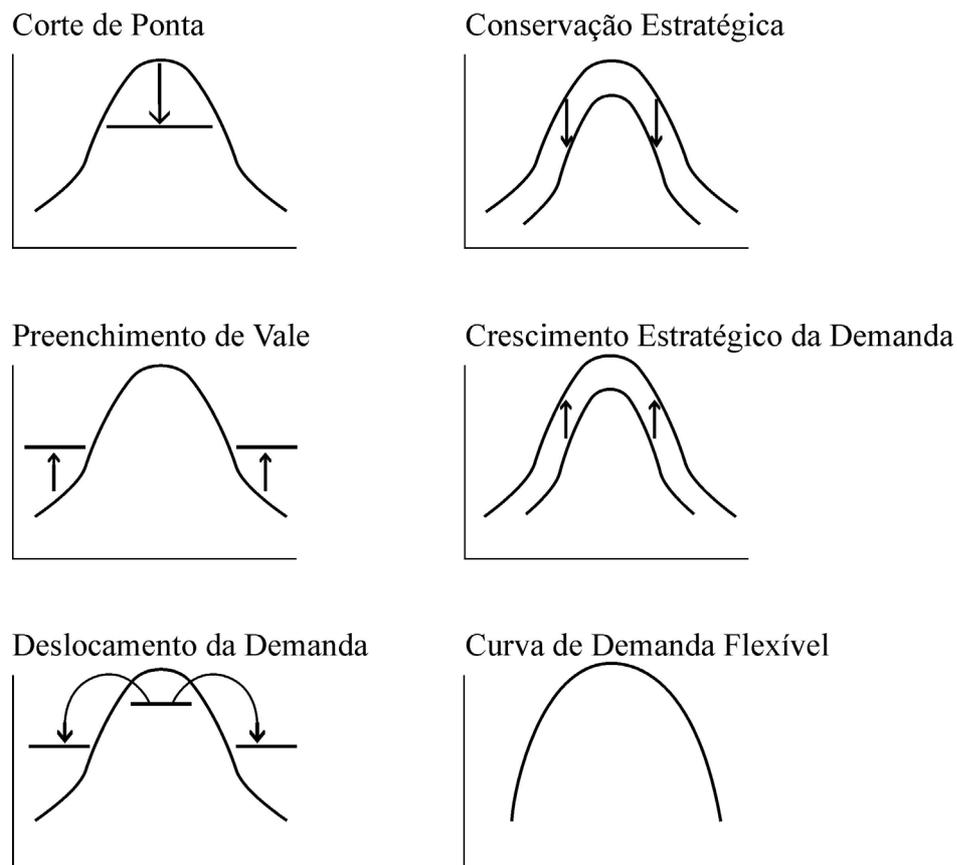
- Preenchimento de vale: Esta técnica incentiva o consumidor a usar mais energia elétrica durante períodos onde a concessionária gera energia a custos mais baixos. O efeito pode ser o de redução dos custos de serviço por distribuir os custos fixos de capacidade sobre uma base maior de venda de energia e também por reduzir custos médios de combustível.
- Deslocamento da demanda: Esta técnica incentiva os consumidores a deslocarem o uso de energia elétrica do período de ponta para fora da ponta. Dessa forma, essa técnica combina os efeitos do corte de ponta e do preenchimento de vale.
- Conservação estratégica: As concessionárias adotam programas focados para incentivar o uso eficiente de energia elétrica com o objetivo de reduzir a demanda não somente no horário de ponta, mas durante as outras horas do dia. Isso pode reduzir o custo médio de combustível e postergar a necessidade para adição futura de capacidade de geração, transmissão e distribuição.
- Crescimento de demanda estratégica: As concessionárias procuram incentivar a adoção de tecnologias baseadas em eletricidade para a substituição de equipamentos ineficientes baseados em combustíveis fósseis ou para melhorar a produtividade do consumidor e sua qualidade de vida. Isso reduz o custo médio de serviço ao distribuir custos fixos sobre uma base maior de vendas de energia, além de beneficiar todos os consumidores.
- Curva de demanda flexível: Programas como o *demand subscription service*<sup>2</sup> e *priority service pricing*<sup>3</sup> são usados para customizar a confiabilidade do serviço de acordo com necessidades individuais de consumidores. As concessionárias podem realizar tanto custos operacionais e fixos futuros permitindo aos despachantes flexibilidade para reduzir ou postergar demanda para consumidores selecionados.

O uso de sistemas de aquecimento solar com complementação elétrica utiliza-se dos conceitos de corte de ponta, conservação estratégica e deslocamento de carga. As demais técnicas não se aplicam ao chuveiro elétrico, por não reduzir o pico da curva de carga ou não ter uma aplicação restrita ao gerenciamento da demanda do chuveiro elétrico (Matajs, 1997).

---

<sup>2</sup> O cliente contrata um nível de potência e recebe um crédito proporcional à diferença entre este nível e o pico da demanda normal estimada. À concessionária é permitida então, como aviso prévio, a limitar o nível de potência para o nível contratado por um determinado período.

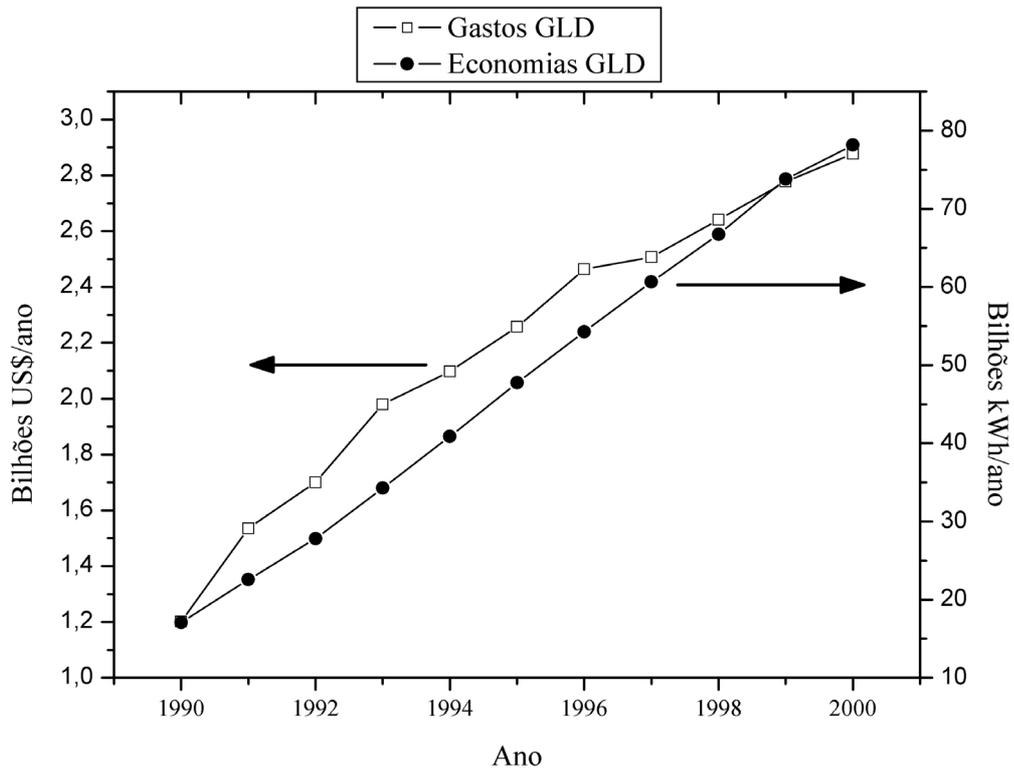
<sup>3</sup> O consumidor paga um preço diferenciado pelo nível de potência disponível e pelo grau de confiabilidade do serviço prestado, além do tempo de uso. Esse esquema tende a achatá-la curva de demanda.



**Fig. 2.1 Técnicas para alterar a forma da curva de carga. Adaptado de Bellarmine & Turner, 1994.**

O *Annual Energy Outlook 2004* (DOE, 2004a) cita os programas de GLD como co-responsáveis pela queda no crescimento do consumo de energia elétrica nos setores comercial e residencial dos EUA, em virtude da redução dos dispêndios energéticos em iluminação, aquecimento de água, refrigeração e acondicionamento de ambientes. De acordo com o Departamento de Energia dos EUA (DOE, 2004b), em 1999, 848 concessionárias de energia elétrica reportaram exercer programas de GLD, das quais 459 são classificadas como grandes concessionárias<sup>4</sup>. A economia de energia propiciada pelos programas de GLD das grandes concessionárias no ano de 1999 foi de 50,6 bilhões de kWh e a redução do pico da curva de carga foi de 26.455 MW. A Fig. 2.2 apresenta a evolução dos gastos e respectivas economias obtidas com os programas de GLD de 1990 a 2000 nos EUA (EIA, 2004) das pequenas e grandes concessionárias.

<sup>4</sup> Grandes concessionárias são aquelas que reportam vendas cujos valores são iguais ou maiores a 150 mil MWh.



**Fig. 2.2 Evolução dos gastos e respectivas economias obtidas com os programas de GLD de 1990 a 2000 nos EUA (EIA, 2004).**

Dentro das iniciativas existentes no Brasil, destaca-se o Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), lançado em dezembro de 1985 em face das sérias dificuldades financeiras encontradas pelo setor energético, com o objetivo de reduzir a necessidade de novos investimentos. O PROCEL vem sistematicamente obtendo melhores resultados a cada ano, como mostra a Tab. 2.1. A meta do programa para o ano de 2015 é a redução de demanda da ordem de 130 bilhões de kWh, evitando a instalação de 25.000MW (cerca de duas usinas de Itaipu). O ganho líquido para o País será de R\$ 34 bilhões (Eletrobrás, 1994).

**Tab. 2.1 Resultados das ações do Procel no período 1994-2003 (PROCEL, 2004)**

<b>Resultados</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>
Investimentos aprovados (R\$ milhões) <sup>5</sup>	10	16	20	41	50
Energia economizada/geração adicional (GWh/ano)	344	572	1970	1758	1909
Redução de demanda na ponta (MW)	70	103	293	976	532
Usina equivalente (MW) <sup>6</sup>	80	135	430	415	440
Investimento evitado (R\$ milhões)	160	270	860	830	880
<b>Resultados</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>
Investimentos aprovados (R\$ milhões)	40	26	30	30	29
Energia economizada/geração adicional (GWh/ano)	1852	2300	2500	1270	1300
Redução de demanda na ponta (MW)	418	640	690	309	270
Usina equivalente (MW)	420	552	600	305	312
Investimento evitado (R\$ milhões)	840	2019	2818	1486	1914

As ações do programa PROCEL são abrangentes, incluindo projetos na área de uso final (refrigeradores e *freezers*, sistemas de motores, iluminação, educação, prêmio PROCEL e o selo de eficiência energética), projetos de redução de perdas na oferta de energia (aqui estão localizadas as ações de GLD) e projetos de geração adicional de energia elétrica.

Um projeto de GLD implantado pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) consistiu na instalação de 4.500 gerenciadores de carga em consumidores residenciais na faixa de consumo de 80 a 200 kWh/mês na região do Vale do Jequitinhonha. O objetivo foi não permitir o uso do chuveiro elétrico no horário de ponta (entre as 17:30 e 19:30), resultando na retirada de 1,95MW de demanda do horário de ponta<sup>7</sup>. O benefício ofertado aos consumidores que aderiram ao projeto correspondeu a uma redução de 20% no valor de suas contas de energia. Um projeto piloto realizado pela Companhia Estadual de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul (CEEE) previu a instalação de gerenciadores de demanda em 5.000 residências com chuveiros elétricos e a Companhia Energética de Brasília (CEB), à época, iniciou um projeto com o objetivo de bloquear o funcionamento de geladeiras na cidade satélite de Santa

<sup>5</sup> Não incluindo os custos com pessoal da Eletrobrás/Procel e incluindo os recursos da Reserva Global de Reversão (fundo federal formado com recursos repassados pelas concessionárias à Eletrobrás).

<sup>6</sup> Obtidas a partir da energia economizada e geração adicional, considerando um fator de capacidade (razão entre a energia gerada e a que seria obtida, usando-se a capacidade nominal durante todo o ano) típico de 56% para usinas hidrelétricas e considerando 15% de perdas médias na transmissão e distribuição para a parcela de conservação de energia.

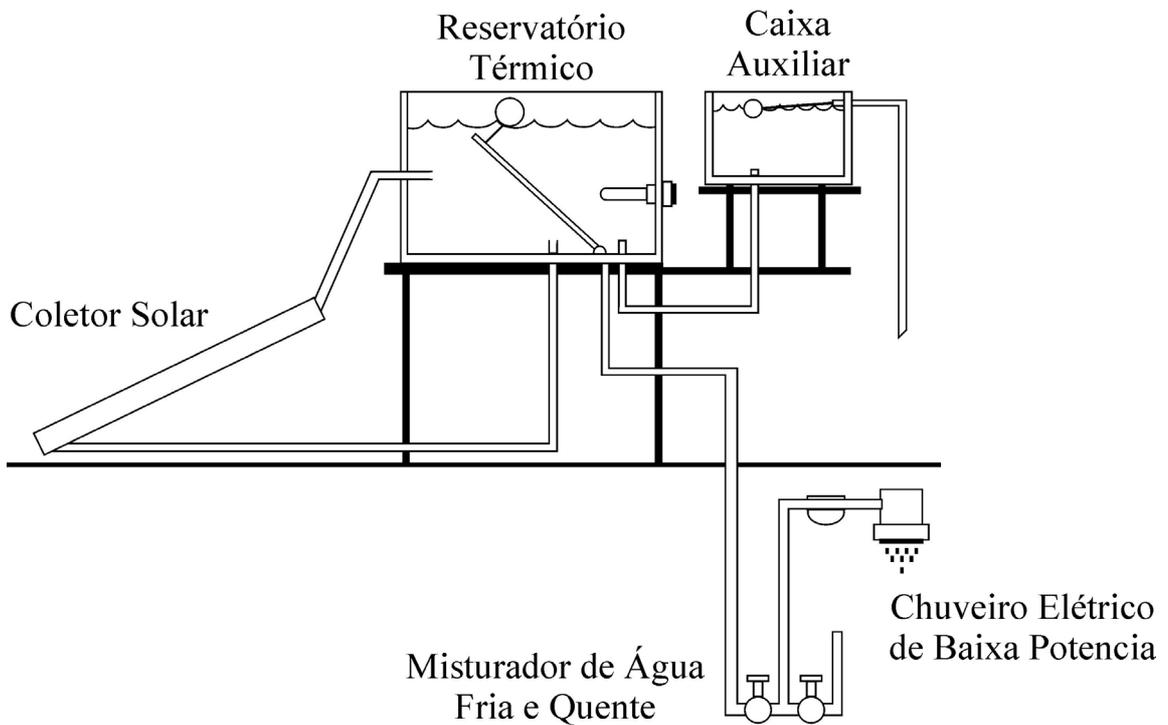
<sup>7</sup> A contribuição média do chuveiro elétrico na demanda do horário de ponta obtida a partir de pesquisa de posse e hábitos de consumidores residenciais em medições de curvas de carga típicas da região indicou o valor de 0,433kW por unidade consumidora.

Maria – DF, no horário das 18:40 às 19:30, com a meta de obter uma redução de 7% a 14% no horário de ponta (Eletrobrás, 1997). Os projetos da CEMIG e CEEE, no entanto, não exploraram o potencial do uso da energia solar para aquecimento de água, que poderia atuar na redução do consumo durante o horário de ponta sem reduzir o conforto do usuário ou impor padrões de consumo de água quente a ele.

Geller *et al.* (1998) salientam a necessidade de dar incentivos às concessionárias que implantarem programas de eficiência energética na área de uso final que estão no interesse nacional. Deve-se permitir às concessionárias recuperar custos, perdas nas vendas e uma parte dos benefícios sociais promovidos pelos seus programas de GLD. A legislação do setor elétrico nacional, através da Resolução N° 334, de 2 de dezembro de 1999 (ANEEL, 1999), autoriza as concessionárias de energia elétrica a desenvolverem projetos visando a melhoria do fator de carga de unidades consumidoras localizadas em suas respectivas áreas de concessão. No entanto, nessa resolução, incentivos não são oferecidos às concessionárias para a implantação de programas de GLD.

## ***2.2 Estratégias de GLD para consumo de água quente***

Oliva & Borgqes (1996) investigaram o uso de energia solar para aquecimento de água no segmento residencial como ação de GLD da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) sobre os chuveiros elétricos na área de abrangência da companhia. O setor residencial contribui com 34% da demanda durante o horário de pico, superando os demais setores, inclusive o industrial. Dentre os equipamentos responsáveis por essa demanda, cita-se o chuveiro elétrico, que, segundo estudo feito em 1988 (Eletrobrás, 1988) possui penetração de 97% na área de concessão da CPFL. No âmbito do projeto foi desenvolvido um pré-aquecedor solar de baixo custo para suprir as necessidades de água quente de uma família composta por 4 a 5 pessoas. As características técnicas do protótipo (veja Fig. 2.3) são mostradas na Tab. 2.2. As potências do resistor do reservatório térmico e do chuveiro elétrico somadas são inferiores à metade da potência do chuveiro elétrico comum. O resistor do reservatório térmico garante o fornecimento de água quente em períodos de baixa incidência de radiação solar.



**Fig. 2.3 Pré-aquecedor solar (Oliva & Borges, 1996).**

**Tab. 2.2 Características técnicas do pré-aquecedor solar (Oliva & Borges, 1996)**

Volume do reservatório térmico	500 l
Área do coletor solar	2 m <sup>2</sup>
Potência do resistor no reservatório térmico	350 W
Potência do resistor do chuveiro elétrico	1650 W
Temperatura de pré-aquecimento (termostato)	30 °C

De acordo com a análise econômica preliminar, o pré-aquecedor solar (potência de 1,7 kW a 2,0 kW) poderia custar cerca de US\$ 400,00<sup>8</sup>. O custo de capacidade evitada no horário de ponta, definido como a razão entre o valor presente líquido dos investimentos feitos no equipamento ao longo da vida útil contábil da produtora de energia elétrica e a capacidade instalada evitada (Oliva *et al.*, 1994), seria de US\$ 377,00/kW, com tempo de retorno de investimento de 3,9 anos. Esta análise preliminar considera que o investimento necessário não é economicamente viável para o consumidor, dentro da estrutura tarifária vigente na época (1996). Em contrapartida, a utilização de pré-aquecedores solares foi considerada economicamente viável para a concessionária, por contribuir com a redução de consumo e da demanda no horário de ponta, melhorando o fator de carga das instalações e postergando investimentos na expansão do sistema elétrico. Resultados parciais do projeto indicaram a

<sup>8</sup> Dólares de 1996

redução da demanda máxima mensal de 47% em função da adoção do pré-aquecedor solar para um caso específico. Resultados finais não existem em função de mudanças na política da empresa, privatizada em novembro de 1997, que resultaram na descontinuidade do projeto.

Matajs (1997) realizou um estudo para investigar a demanda, consumo e custo das alternativas ao chuveiro elétrico no estado de São Paulo. As alternativas aos chuveiros elétricos avaliadas foram o aquecedor solar com complementação a gás e complementação com energia elétrica, aquecedores de acumulação elétricos e a gás natural e aquecedores de passagem a gás natural. A substituição dos chuveiros elétricos é vista como uma ação de GLD de deslocamento da ponta.

O dimensionamento dos sistemas de aquecimento solar usou uma estimativa de rendimento de 33%, valor que se refere a um coletor solar de baixa eficiência. A partir do cálculo da energia mensal necessária para aquecimento de água com aquecedores de acumulação e de médias diárias mensais de irradiação solar para o estado de São Paulo, a área de placa dos coletores solares para cada mês do ano foi estimada. O dimensionamento dos aquecedores solares baseou-se no conceito de Custo do Ciclo de Vida ou *Life Cycle Cost* (LCC), definido como o valor presente de todos os custos (iniciais, de operação e manutenção) da alternativa em questão ao longo da vida útil do equipamento.

No trabalho de Matajs (1997), a análise econômica das alternativas ao chuveiro elétrico contemplou o ponto de vista do consumidor e da concessionária. No caso do consumidor, considerou-se que todo o investimento é arcado pelo mesmo. A alternativa é considerada viável quando a economia propiciada pelo sistema é superior ao LCC. Em todas as regiões do estado analisadas, a opção com menor LCC foi o aquecedor solar complementado ora por energia elétrica, ora por gás natural. Ao calcular o tempo de retorno do investimento, somente algumas opções apresentaram tempos inferiores à vida útil do equipamento. Isso provavelmente deve-se ao baixo valor usado para o rendimento dos coletores solares (33%).

Para a concessionária, a medida de GLD é considerada viável quando os custos marginais de expansão são superiores ao custo da potência evitada de pico (CPEP). O CPEP é calculado dividindo-se o custo da alternativa ao chuveiro elétrico pela potência evitada no horário de ponta. A contribuição dos chuveiros elétricos para o horário de ponta foi estimada considerando que 50% de todos os chuveiros elétricos são usados entre as 18h e 19h (Eletrobrás, 1988). Ainda, supondo que sejam usados de maneira uniforme durante esse

intervalo de tempo, e que a duração média do banho seja de 8 min (0,13h), a probabilidade de que 50% dos chuveiros elétricos sejam ligados ao mesmo tempo é de 13%. A obtenção da potência evitada é finalmente obtida multiplicando a potência dos chuveiros por esses valores. Para um chuveiro de 4,2 kW a potência evitada estimada dessa forma é de 273 W ( $4200 \times 0,5 \times 0,13$ ). O custo marginal de expansão considerado foi de US\$ 2150,00 por kilowatt. Dentro desse cenário, os aquecedores solares com complementação de energia elétrica foram viáveis como medidas de GLD em apenas duas regiões e considerando a substituição de chuveiros elétricos de potência elevada (8,0 kW). Mesmo nessas regiões, as alternativas usando aquecedores de acumulação e principalmente aquecedores de passagem a gás natural apresentaram CPEPs bastante inferiores. Atribui-se isso aos elevados custos operacionais dos aquecedores solares, consequência direta do valor de rendimento adotado (33%).

O autor argumenta que não houve nenhuma alternativa que, simultaneamente, trouxesse benefícios econômicos tanto para a concessionária quanto para o consumidor. Baseado nesse fato, o autor propõe que a concessionária, em vez de investir na expansão da capacidade de geração, subsidie parte do investimento inicial necessário à aquisição dos aquecedores solares correspondente ao custo de geração da potência evitada. Usando o mesmo exemplo citado no parágrafo anterior, um chuveiro de 4,2 kW poderia ter sua contribuição de 273 W na ponta evitada. Adotando um custo marginal de expansão<sup>9</sup> de US\$ 2150,00 por kilowatt, obtemos o valor de US\$ 586,95 que poderia ser repassado ao consumidor para a aquisição do sistema de aquecimento solar, reduzindo o investimento inicial por parte deste. Recalculando os tempos de retorno de investimento, eles tornaram-se mais atraentes, porém ainda não o suficiente, fato atribuído aos elevados custos operacionais.

No trabalho descrito acima nenhuma análise de sensibilidade foi realizada com relação à taxa de desconto usada, de 12%. Essa variável é fundamental para qualquer análise econômica e sua importância é muitas vezes negligenciada. O cálculo da necessidade energética auxiliar dos aquecedores solares adotado é rudimentar. Há necessidade de emprego de ferramentas de simulação e dados meteorológicos em base horária para que efeitos transientes e diferenças entre perfis de consumo de água quente possam ser contemplados, assim como os efeitos de uma tarifa horo-sazonal, mesmo não sendo objeto do estudo analisado. Não obstante, o trabalho apresenta um importante contribuição ao colocar em evidência o problema acarretado pelo uso de chuveiros elétricos para o aquecimento de água no setor residencial. Além disso, o

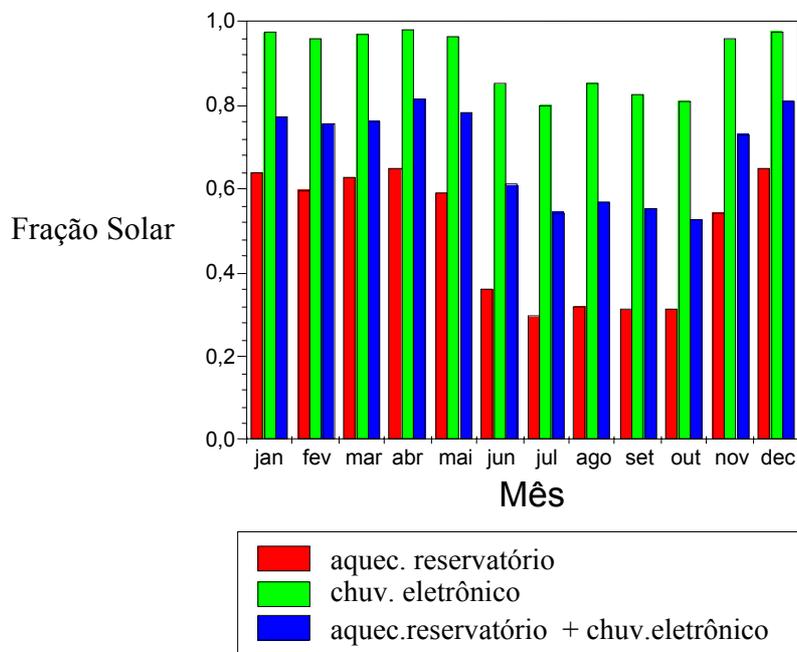
---

<sup>9</sup> Dólares de 1997. 1 US\$ = R\$ 1,08

autor propõe soluções para o problema, chegando a conclusões importantes sobre a viabilidade técnico-econômica das alternativas.

Abreu (2000) investigou o desempenho de três configurações de sistemas de aquecimento para a cidade de Florianópolis, a saber:

- Sistemas com aquecimento no reservatório: sistema tradicional composto por placa coletora e reservatório térmico. O elemento de aquecimento auxiliar localiza-se dentro do reservatório térmico e a circulação entre o reservatório e a placa é do tipo natural.
- Sistemas com chuveiro eletrônico: sistema igual ao anterior, porém sem resistência de aquecimento auxiliar no reservatório térmico. O aquecimento complementar é feito diretamente no ponto de consumo, sendo necessário um chuveiro com potência elevada para garantir o aquecimento em dias onde o nível de radiação solar for muito baixo.
- Sistemas com aquecimento no reservatório e chuveiro eletrônico – visto que na configuração anterior o chuveiro eventualmente necessita de uma potência elevada, uma alternativa é um sistema híbrido, onde o pré-aquecimento é feito no reservatório térmico e o chuveiro elétrico é usado apenas para o aquecimento final, caso seja necessário. Dessa forma esse elemento pode ter sua potência reduzida.



**Fig. 2.4 Fração solar dos diferentes sistemas de aquecimento solar (Abreu, 2000).**

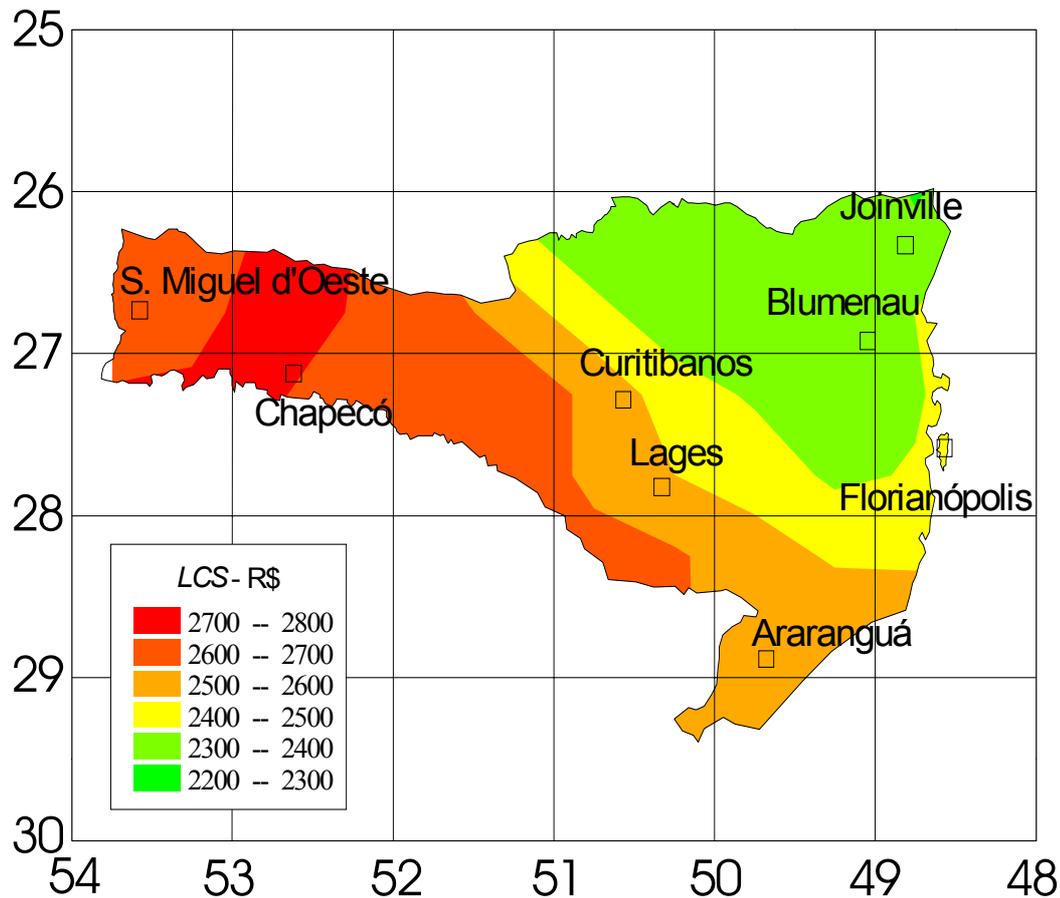
Em todos os sistemas o reservatório é de 100 litros, a área de placa é de 1,35 m<sup>2</sup> e o consumo de água diário é de 160 litros a 40°C. O custo aproximado dos sistemas<sup>10</sup> é de R\$ 1.000. A ferramenta de simulação usada foi o TRNSYS e os dados meteorológicos foram obtidos através do tratamento estatístico de uma série histórica de 10 anos coletada em uma estação meteorológica padrão BSRN - *Baseline Surface Radiation Network* (Abreu *et al.*, 2000). Os resultados obtidos para a fração solar de um ano típico em Florianópolis são mostrados na Fig. 2.4. O sistema sem aquecimento no reservatório obteve a maior fração solar, como era de se esperar em função da menor temperatura média de entrada de água no coletor, fazendo com que o sistema funcionasse com um rendimento mais alto comparado às outras configurações. A mesma tendência é verificada no consumo mensal de energia.

No caso do sistema com aquecimento no reservatório térmico e chuveiro eletrônico de potência reduzida (potência máxima = 3,5 kW), em aproximadamente 70% dos dias do ano o chuveiro eletrônico funcionou com uma potência muito baixa ( $0 \leq P/P_{\max} \leq 0,2$ ) ou até mesmo nem chegou a ser acionado.

Uma análise de viabilidade econômica foi feita para o estado de Santa Catarina usando o conceito de Economia do Ciclo de Vida ou Life Cycle Savings (LCS), definido como sendo a diferença entre o valor presente entre os custos da alternativa não-solar e da alternativa solar durante a vida útil dos sistemas. Esse conceito sempre compara a alternativa solar com uma outra tecnologia, sendo muito usada para mostrar que a tecnologia solar constitui de fato uma opção rentável de investimento. Atualmente, o conceito de LCC é o mais comumente empregado. A Fig. 2.5 mostra o LCS obtido para as diversas regiões solarimétricas do estado. Observa-se que o extremo oeste catarinense é a região mais favorável, sendo que a região de Joinville apresenta o LCS mais baixo.

---

<sup>10</sup> Reais de 2000.



**Fig. 2.5 LCS para o estado de Santa Catarina – coletor tradicional -1,35m<sup>2</sup>, custo total – R\$750,00, vida útil – 20 anos (Abreu, 2000).**

Pereira *et al.* (2003) conduziram um projeto piloto na cidade de Contagem, MG, onde 100 sistemas de aquecimento solar, dos quais 30 eram compactos, foram instalados em um conjunto habitacional para a população de baixa renda. O consumo de energia elétrica total das residências foi monitorado entre os meses de setembro do ano 2000 e março de 2002. Nesse período, houve uma redução do consumo médio mensal de 37,7% comparado ao mês de referência de setembro de 2000. Essa redução percentual em relação a um mês de referência não considera possíveis variações sazonais no consumo de energia elétrica. Além disso, a comparação entre o consumo de energia elétrica de moradores com e sem o sistema de aquecimento solar, para o mesmo período, não foi realizada. A partir de julho de 2001, o Governo Federal instituiu um programa de racionamento de energia elétrica estabelecendo uma meta mínima de redução em 20%, usando o mês de abril de 2000 como referência, impondo multas e possíveis cortes em caso de não cumprimento da meta estabelecida. Esse fato contribuiu de maneira significativa, segundo os autores, para a redução observada no consumo de energia elétrica. A Tab. 2.3 mostra a evolução do consumo médio de energia elétrica por residência durante a vigência do projeto. O primeiro mês, usado como referência,

é sombreado na tabela, assim como os meses em que o programa de racionamento de energia elétrica estava vigente.

**Tab. 2.3 Consumo Médio Mensal de Energia Elétrica por residência – Pereira *et al.* (2003)**

Mês	Ano	kWh
Setembro <sup>11</sup>	2000	140
Outubro	2000	123
Novembro	2000	94
Dezembro	2000	110
Janeiro	2001	110
Fevereiro	2001	106
Março	2001	98
Abril	2001	109
Maio	2001	95
Junho	2001	93
Julho <sup>12</sup>	2001	77
Agosto	2001	74
Setembro	2001	82
Outubro	2001	75
Novembro	2001	83
Dezembro	2001	76
Janeiro	2002	97
Fevereiro	2002	87
Março	2002	83
Média	-	92,9
Economia (%)	-	33,7

Almeida *et al.* (2001) fazem um prognóstico da quantidade total de energia conservada e da redução do pico da curva de carga no setor residencial brasileiro para cinco cenários diferentes. Em sua análise, o Brasil é dividido em cinco macro-regiões, com três classes de

<sup>11</sup> Mês de referência (sem sistema de aquecimento solar instalado)

<sup>12</sup> De julho de 2001 até março de 2002 – racionamento obrigatório em vigência.

consumidores em cada região, perfazendo um total de 15 subsetores. A participação de cada tipo de uso de energia elétrica varia de acordo com a região. O ano-base considerado é 1997. A partir de índices de crescimento projetados para cada região, o número de residências em cada setor até o ano 2020 é estimado. O consumo específico anual por residência de cada subsetor é projetado com base em curvas logísticas<sup>13</sup> ajustadas para o período 1988-1995, com o nível de saturação (limite superior) sendo o consumo médio de eletricidade por residência de todos os países OECD - *Organisation for Economic Cooperation and Development* - em 1995. Cinco cenários futuros são simulados, a saber:

- Cenário Potencial Técnico: O potencial de conservação associado com este cenário é definido como a economia de energia elétrica obtida com as alternativas mais eficientes disponíveis no ano base. Aspectos econômicos são desconsiderados.
- Cenário Potencial Econômico: É definido pela economia total de energia elétrica obtida com medidas de eficiência energética cujo valor presente líquido seja positivo, a uma taxa de desconto efetiva de 15% a.a.
- Cenário Potencial de Mercado I: Similar ao cenário anterior, sendo, no entanto, mais restritiva. Somente medidas que propiciem uma taxa de retorno do investimento superior a 35% a.a. são consideradas.
- Cenário Potencial de Mercado II: Somente medidas que propiciem uma taxa interna de retorno superior a 70% a.a. são consideradas.
- Cenário de Não-Conservação: Nenhum ganho em eficiência é assumido, havendo crescimento no consumo específico em função da elevação da saturação de equipamentos nas residências.

A redução da carga no horário de ponta é determinada através de um coeficiente de conservação da demanda (CCD), definido como sendo:

$$CCD = \frac{\text{economia anual de energia [kWh]}}{\text{redução do pico da demanda [kW]} \times 8760 [h]} \quad (2.1)$$

Este valor é diferente para cada medida de conservação e é obtido na literatura e com base em curvas de carga de consumidores residenciais no Brasil. Na análise, os preços reais

---

<sup>13</sup> Curvas logísticas são obtidas a partir da função sigmóide, dada pela fórmula  $P(t) = 1/(1 + e^{-t})$ , sendo normalmente usadas em várias áreas do conhecimento.

de combustíveis e eletricidade foram considerados constantes. As taxas de melhoria de eficiência de cada alternativa tecnológica foram consideradas constantes para todos os subsetores, com exceção das medidas de uso da energia solar para aquecimento de água. Pela falta de dados existentes, 40% dos chuveiros elétricos foram substituídos por sistemas de aquecimento solar, 40% com pré-aquecedores solares (muito semelhante à tecnologia usada no presente trabalho) e 20% com aquecedores a gás. Medidas de conservação para aquecimento de água não foram consideradas economicamente viáveis nos cenários de Mercado e no cenário Econômico. No entanto, tecnicamente, essas medidas são capazes de conservar 33% da energia total consumida e reduzir o consumo no horário de ponta em 65% em relação ao cenário de Não-Conservação. A Tab. 2.4 mostra a participação de cada medida de conservação de acordo com os diferentes usos da energia elétrica para o ano 2020 (cenário técnico).

**Tab. 2.4 Contribuição das medidas de conservação sobre o consumo total e sobre o consumo no horário de ponta - prognóstico para 2020, cenário Técnico (Almeida *et al.*, 2001).**

Conservação de Energia

Região	Iluminação		Refrigeração		Ar-Condicionado		Aquecimento de Água		Total	
	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]
Sudeste	9461	30	7950	25	1119	4	12.713	41	31.243	100
Sul	2521	33	2148	28	140	2	2936	38	7745	100
Norte	2925	54	1504	28	566	10	432	8	5428	100
Nordeste	4447	51	2844	32	302	3	1189	14	8782	100
Centro-Oeste	1635	31	1286	25	124	2	2151	41	5195	100
Brasil	20.989	36	15.732	27	2251	4	19.422	33	58.393	100

Redução do Consumo no horário de ponta

Região	Iluminação		Refrigeração		Ar-Condicionado		Aquecimento de Água		Total	
	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]	[GWh]	[%]
Sudeste	3600	18	1134	6	752	4	14.513	73	19.999	100
Sul	959	20	306	7	94	2	3351	71	4711	100
Norte	1113	51	215	10	380	17	494	22	2202	100
Nordeste	1692	46	406	11	203	6	1358	37	3658	100
Centro-Oeste	622	19	183	5	83	2	2455	73	3344	100
Brasil	7987	24	2245	7	1511	4	22171	65	33913	100

A análise econômica efetuada por Almeida *et al.* (2001) considera um preço de US\$ 1250,00 para aquisição do aquecedor solar, US\$ 490,00 para o pré-aquecedor solar e US\$ 700,00 para o aquecedor a gás. Estes valores são baseados na conversão monetária de 1995 (US\$ 1,00 = R\$ 0,92), que atualmente não representa o valor real da moeda brasileira. Uma análise econômica atual terá que considerar o câmbio flutuante. Outro aspecto que não é mencionado é a vida útil de cada alternativa de conservação, que no caso de aquecedores solares é de aproximadamente 20 anos. Apesar de considerar diferenças regionais na eficiência das tecnologias solares (fração solar), nada é dito sobre valores das eficiências usadas em cada região. A taxa efetiva de desconto utilizada, de 15% a.a., apesar de ser menor

que o rendimento médio da poupança para o ano base de 1997 (16,5 % a.a.), é significativamente superior aos rendimentos da mesma poupança em anos subsequentes (12,77 % a.a., 12,25% a.a. e 8,39 % a.a. em 1998, 1999 e 2000, respectivamente). A escolha da taxa de desconto é crucial na análise econômica é questão controversa.

Os trabalhos descritos anteriormente fornecem contribuições importantes para a análise da viabilidade técnico-econômica de sistemas de aquecimento solar e seu impacto sobre a curva de demanda. No entanto, as conclusões obtidas são baseadas quase que exclusivamente em resultados teóricos ou cálculos simplificados. Mesmo quando dados de medição estão disponíveis, não há comparação com um outro grupo de referência sem sistemas de aquecimento solar. No presente trabalho, a medição da potência média do chuveiro elétrico em intervalos de cinco minutos é realizada em dois grupos, um com e outro sem sistemas de aquecimento solar. A partir desses dados é possível extrair uma ampla gama de informação, inclusive sobre padrões de consumo de água quente. O acompanhamento das contas de energia das residências também permite identificar o percentual do gasto mensal de energia elétrica atribuído ao chuveiro elétrico. Juntamente com os elementos citados acima, o uso de uma ferramenta de simulação transiente amplamente difundida, com dados meteorológicos tratados estatisticamente, traz grande credibilidade aos resultados que são aqui apresentados.

Cragan *et al.* (1995) realizaram um estudo sobre o impacto de um conjunto de sistemas de aquecimento solar em uma concessionária de energia elétrica no estado de Wisconsin, EUA. As variáveis analisadas foram a redução marginal das emissões, custos de geração evitados, economia de energia, redução do pico da curva de demanda, e a contribuição para a capacidade de geração da concessionária propiciada pelo uso de sistemas de aquecimento solar. O sistema usado como referência foi o de acumulação elétrico, sendo que doze configurações diferentes de sistemas de aquecimento solar assistidos por energia elétrica foram estudadas, além de um sistema de aquecimento a gás juntamente com outros seis sistemas de aquecimento solar assistidos a gás. Para essa análise, a curva de carga da concessionária em base horária do ano de 1991 foi usada. O estudo inclui uma análise econômica, tanto do ponto de vista da concessionária quanto do consumidor. Para a concessionária, o investimento em sistemas de aquecimento solar é considerado uma medida de GLD, a qual deve ser quantificada em termos de fornecimento de energia e aumento de capacidade, ao mesmo tempo em que causa uma redução da demanda, emissões e vendas. Para a concessionária, a alternativa que apresentar o menor custo do ciclo de vida é a mais vantajosa. No caso dos consumidores, a análise é feita sob a ótica da economia do ciclo de

vida, comparando as diversas opções com o sistema referência. A monetarização da redução das emissões foi realizada para três níveis, variando entre US\$0/ton até os maiores valores encontrados na literatura. O software WATSIM<sup>14</sup> foi usado para gerar perfis de consumo de água quente estatisticamente representativos. A simulação térmica foi realizada com o programa TRNSYS. Os resultados obtidos mostram que cada sistema de aquecimento solar com 6 m<sup>2</sup> de área de placa pode economizar anualmente 3,56 MWh, reduzir 0,66 kW do pico da curva de demanda, e evitar a emissão de mais de 4 toneladas de poluentes (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> e particulados). Dos 12 sistemas de aquecimento solar investigados, cinco apresentaram um custo menor por kWh gerado do que uma turbina a gás (US\$0,06/kWh), mesmo sem capitalizar a redução na emissão de poluentes. Na medida em que os sistemas de aquecimento solar recebem crédito pela redução na emissão de poluentes, todos os sistemas, com exceção de apenas um, tornam-se competitivos com a turbina a gás, cinco são mais econômicas que uma usina de carvão intermediária e dois dos sistemas apresentam valores menores que as usinas de geração da base. Ao considerar os maiores valores publicados para a monetarização de poluentes, todos os sistemas de aquecimento solar fornecem energia a um custo menor que as usinas do consumo de base e seis sistemas de aquecimento solar economizam dinheiro para a concessionária por cada kWh produzido ao longo de sua vida útil. Para o consumidor, sem considerar descontos oferecidos pela concessionária, seis dos doze sistemas fornecem um fluxo de caixa positivo. Com um desconto pela redução da demanda, nove sistemas passam a fornecer um fluxo de caixa positivo. Ao adotar descontos para a redução na emissão de poluentes, redução da demanda e custos evitados de geração, todos os sistemas de aquecimento solar passam a ser economicamente viáveis para o consumidor. A análise econômica assumiu que a concessionária adquire o sistema e os consumidores a pagam ao longo da vida útil através de uma taxa na conta de luz.

Trzesniweski *et al.* (1996) adotaram uma metodologia muito semelhante àquela usado no trabalho citado acima para investigar o impacto de um programa de GLD sobre uma concessionária de energia elétrica e seus consumidores, também no estado de Wisconsin, EUA. Nesse caso, o impacto de 5.000 sistemas de aquecimento solar foi quantificado. Os resultados obtidos mostram que, em média, cada sistema de aquecimento solar é capaz de economizar 3,20 MWh, reduzir a emissão de poluentes em 2 toneladas e aumentar a capacidade de geração em 0,7 kW. A economia anual obtida pela concessionária é de US\$ 385.000,00 com um retorno de investimento superior a 20%. Em média, cada consumidor terá

---

<sup>14</sup> Software desenvolvido pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI).

uma economia anual de US\$ 211 em sua conta de luz, com o sistema de aquecimento solar tendo uma fração solar anual de 0,56.

Os dois trabalhos referenciados acima são os únicos encontrados na literatura que fazem uma análise completa com relação ao impacto de sistemas de aquecimento solar sobre a concessionária de energia elétrica e o meio ambiente, usando para isso, simulação em base horária e dados de demanda da concessionária, também em base horária. A justificativa para essa necessidade é que a economia de energia e redução na emissão de poluentes depende dos custos operacionais e características técnicas da usina marginal, definida como a última usina a ser acionada à rede para atendimento da demanda. Sendo assim, dados horários de operação da concessionária de energia elétrica são necessários para efetuar a análise.

### **2.3 Consumo de água quente**

Os perfis de consumo de água quente constituem, juntamente com os dados meteorológicos locais, os dados de entrada mais importantes para a simulação de sistemas solares de aquecimento solar de água quente. A total falta de informação sobre o consumo de água quente em famílias de baixa-renda no Brasil é uma dificuldade a ser superada. Jónsson *et al.* (1994) propuseram uma técnica de modelagem para estimar o consumo de água quente em sistemas de aquecimento distritais onde apenas a medição da vazão total era disponível. Em seu estudo, o uso de água quente para fins de consumo (banho, lavar roupas, etc.) era considerado em grande parte independente das condições climáticas. Lowenstein & Hiller (1996) apresentam uma metodologia que consiste em coletar dados de vazão de água quente com grande resolução (valores medidos em intervalos de 15 segundos ou menos) de maneira a reconhecer padrões de vazão para usos específicos dentro da residência. Em um artigo posterior, Lowenstein & Hiller (1998) sugerem a monitoração da temperatura da tubulação de água quente como uma maneira economicamente eficiente de aumentar o número de edifícios que poderiam ser monitorados. Abrams & Shedd (1996) coletaram dados em 20 edifícios comerciais e 16 sítios residenciais de 1983 a 1995. O consumo diário de água quente encontrado variou significativamente em relação aos valores médios anuais e variações sazonais na temperatura de fornecimento de água fria tiveram um efeito substancial sobre o consumo de energia para aquecimento de água. Jordan & Vajen (2000) simularam um sistema de aquecimento solar com diferentes perfis de consumo de água quente e concluíram que o uso de perfis mais realistas frente a perfis simplificados reduziu a fração solar em 3% no verão. Knudsen (2002) realizou simulações numéricas com modelos detalhados para

investigar a influência de diferentes valores de consumo e padrões de consumo sobre o desempenho térmico de sistemas de aquecimento solares domésticos. Em seu estudo, a fração solar foi maior em sistemas com perfis não-realistas do que com perfis realistas.

Os dados disponíveis sobre consumo de água quente são baseados em medições realizadas em países desenvolvidos, que possuem diferentes características de consumo de água quente daquelas verificadas no Brasil, com poucas exceções (Meyer & Tshimankinda, 1998a; Meyer & Tshimankinda, 1998b; Papakostas *et al.*, 1995). A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), através do Programa de Uso Racional da Água (PURA), realizou a monitoração piloto do consumo de água no Conjunto Habitacional Jardim São Luiz – São Paulo (6 blocos de medição em 6 prédios diferentes), destinado à população de baixa renda. As medições mostraram que 55% do consumo diário de água é destinado ao chuveiro, perfazendo um total de 238 litros diários por habitação. De acordo com a mesma empresa, o consumo diário para tomar banho com chuveiro elétrico (dois banhos ao dia) de uma família de 4 pessoas é de 30 l por habitante (Sabesp, 2004). Vine *et al.* (1986) investigaram o consumo doméstico de água quente em quatro edifícios administrados pela *Public Housing Authority* de San Francisco. Seus resultados mostraram que informações coletadas via questionário podem ser usadas para estimar o consumo de água quente sem monitoração detalhada.

O registro temporal do consumo de água quente em cada residência é extremamente oneroso e impraticável dentro do contexto do presente trabalho. Não obstante, através de um questionário baseado naquele usado por Vine *et al.* (1986), perfis de consumo de água quente para cada família foram derivados. Esses perfis fornecem informação sobre o horário dos banhos e sua duração. O mesmo tipo de informação é obtido das medições realizadas *in situ*, que então é comparada aos perfis coletados via questionário. Dessa forma, a técnica pode ser estendida a outras regiões como forma econômica e tecnicamente viável para a obtenção de informação sobre o consumo de água quente em residências.

## 2.4 *Software de simulação*

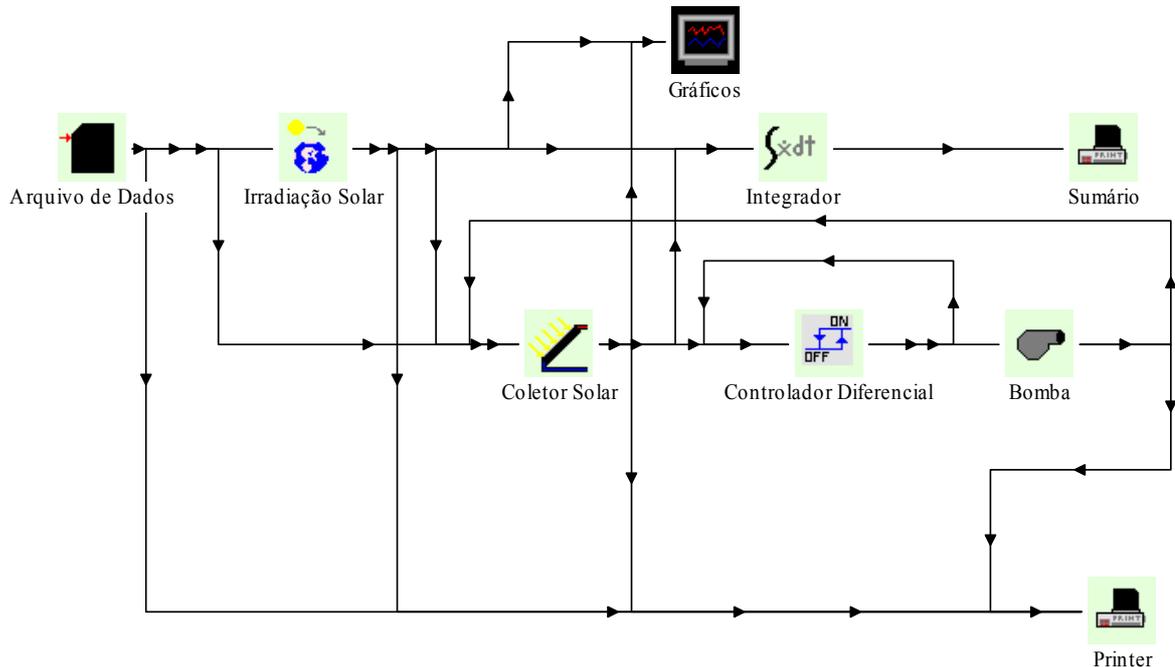
### 2.4.1 “A Transient System Simulation Program (TRNSYS)”

TRNSYS é um programa de simulação modular de sistemas (TRNSYS, 2000). A modularidade do programa lhe confere grande flexibilidade e facilita a adição de modelos matemáticos não incluídos na biblioteca padrão. Como o nome sugere, o *Transient System Simulation Program* é adequado para a análise detalhada de sistemas cujo comportamento varie com o tempo como, por exemplo, sistemas de aquecimento solar, sistemas de refrigeração e condicionamento de ar e o comportamento térmico de edificações, entre outros.

Os sistemas reais são simulados interligando componentes físicos individuais constituintes do sistema, baseados no fluxo de informação existentes entre estes. Além dos componentes físicos, existem outros componentes acessórios que servem para o processamento de dados de simulação, interface gráfica, leitura de arquivos, etc. Cada componente é modelado matematicamente por uma série de equações e a tarefa do TRNSYS é resolver essas equações simultaneamente para cada intervalo de tempo, assegurando a convergência da solução. TRNSYS é escrito em Fortran e o seu código é aberto, permitindo ao usuário fazer a inclusão de componentes não disponíveis na biblioteca padrão, a qual é bastante extensa.

Programas independentes foram desenvolvidos para facilitar a geração do arquivo de entrada usado pelo TRNSYS, dentre os quais destaca-se o IISiBat. O IISiBat é uma interface gráfica amigável onde os componentes individuais do sistema são representados por ícones e a tarefa do usuário é a de interligar os componentes de maneira adequada, além de definir todos os parâmetros de simulação necessários. O IISiBat então gera o arquivo com os parâmetros de entrada do TRNSYS. A Fig. 2.6 apresenta um sistema de aquecimento solar com circulação forçada, cujos dados de irradiação solar são lidos de um arquivo e processados por um componente que incorpora vários modelos usados para calcular a irradiação solar incidente em superfície inclinada, descritos na literatura, para então serem repassados ao coletor. Um controlador diferencial aciona a bomba que faz circular água pelo coletor solar. O sistema é fechado e não há consumo de água. Componentes adicionais exibem os resultados da simulação na tela do usuário, como o *Online Plotter* e outros são responsáveis pelo

processamento e registro dos dados, como é o caso do *Quantity Integrator* e o *Printer*, respectivamente.



**Fig. 2.6 Sistema de aquecimento solar modelado no IISiBat**

O TRNSYS permite ao usuário a escolha de um entre três métodos numéricos: o método de Euler modificado, o método de Heun original não auto-inicializador e o método de Adams de quarta ordem, sendo que o método de Euler modificado é usado como padrão.

Versões do TRNSYS anteriores à versão 11.1 usavam o método de Heun para resolver equações diferenciais ordinárias<sup>15</sup>. É um método preditor-corretor que usa o método de Euler para o passo preditor e a regra trapezoidal para o passo corretor. A derivada é considerada constante em cada intervalo, sendo igual à média das derivadas no começo e no fim do intervalo.

Objetivando a melhora da eficiência computacional no TRNSYS 12.1, muitas das soluções numéricas foram substituídas por soluções analíticas aproximadas. Nesses casos, considera-se que as derivadas variam exponencialmente no passo no tempo. Para ser consistente com soluções analíticas, o método de Heun foi substituído pelo método modificado de Euler (também conhecido como o método do polígono melhorado). O método

<sup>15</sup> A versão usada no presente trabalho é a 15.3.00

de Euler é usado para o passo preditor, enquanto o passo corretor usa a derivada no meio do intervalo.

A partir da versão 13, o método de Heun voltou a ser disponível aos usuários, assim como o método de Adams de quarta ordem. Este método usa o método Runge-Kutta de quarta ordem para inicializar, a formula Adams-Bashford de quarta ordem como preditor e o método Adams-Moulton de quarta ordem como corretor.

#### **2.4.2 “Generic Optimization Program (GenOpt)”**

GenOpt é um programa de otimização cuja função objetivo é calculada por um programa de simulação externo (Wetter, 2001; Wetter, 2004). O programa foi desenvolvido para problemas de otimização onde a função objetivo é computacionalmente complexa e cujas derivadas são difíceis de avaliar ou até mesmo nem existem. GenOpt pode ser acoplado a qualquer outro programa de simulação que leia seus dados de entrada e que escreva os resultados em um arquivo texto. As variáveis independentes podem ser variáveis contínuas (possivelmente com limites inferiores e superiores), variáveis discretas, ou ambas. Restrições às variáveis podem ser implementadas usando funções penalidades ou de barreira.

GenOpt possui uma biblioteca com algoritmos de otimização local e global, uni- e multidimensionais e algoritmos para realizar análise de sensibilidade paramétrica. Uma interface amigável permite a adição de novos algoritmos de otimização sem o conhecimento de detalhes da estrutura do programa.

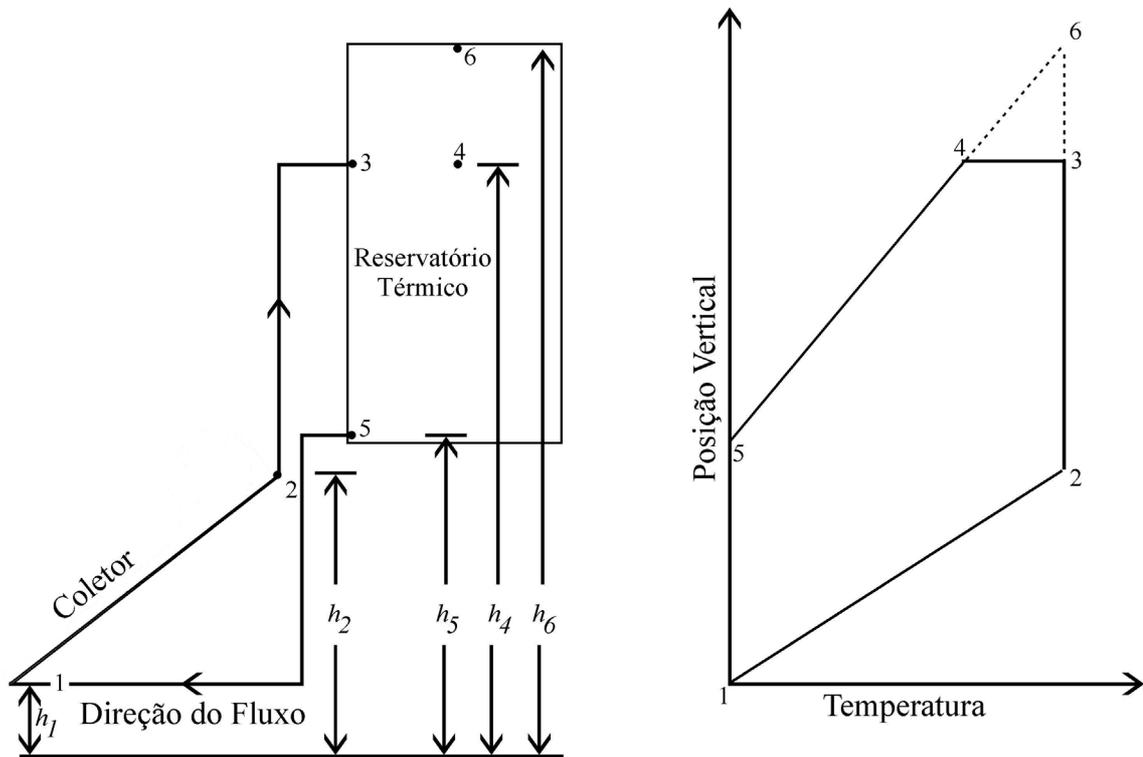
GenOpt é escrito em Java, o que o torna independente de plataforma e a interface generalista faz do GenOpt um programa aplicável a uma vasta gama de problemas de otimização. GenOpt não foi desenhado para problemas de programação linear, problemas de programação quadrática e problemas onde o gradiente da função objetivo é conhecido. Para tais problemas, softwares específicos mais eficientes podem ser encontrados.

### **3 Validação do Modelo do Coletor Solar com Reservatório Térmico Integrado**

A validação do modelo do coletor solar com reservatório térmico integrado (TYPE 45) é importante para viabilizar o uso do software TRNSYS para a previsão do impacto do uso de sistemas de aquecimento solar usando dados meteorológicos e de consumo de água quente de outras cidades brasileiras. Nesta parte do trabalho, uma revisão histórica dos modelos desenvolvidos para o circuito termossifão é inicialmente feita e em seguida o modelo atual implementado no TRNSYS é descrito. Os modelos computacionais dos sistemas periféricos (cálculo da radiação solar incidente em plano inclinado, sistema de auxiliar de aquecimento de passagem, curva de demanda, sistema de mistura, tubulação) também são explicados sucintamente. Posteriormente, a metodologia de validação, assim como a bancada experimental são descritos. Finalmente, os resultados alcançados e as conclusões pertinentes são apresentados.

#### ***3.1 Sistemas de aquecimento de água por circuito termossifão***

O modelo do coletor solar com reservatório térmico integrado do TRNSYS foi desenvolvido a partir do trabalho de Close (1962), o primeiro estudo teórico para a predição do fluxo de massa e variação de temperatura ao longo de um circuito termossifão, como mostra a Fig. 3.1. Nesse estudo, o autor considera um perfil linear de temperatura dentro do reservatório térmico e no coletor, além da ausência de perdas térmicas nas conexões. A perda de carga específica por fricção é calculada para condições de escoamento laminar plenamente desenvolvido e igualada à altura manométrica equivalente à diferença de pressão existente entre o ramo que leva água ao coletor e o ramo que traz água do coletor para o reservatório, aqui denominado de “ganho-termossifão”. A aplicação da equação de Bernoulli para escoamentos incompressíveis ao circuito termossifão resulta na Eq. (3.1).



**Fig. 3.1 Diagrama mostrando um circuito termossifão e a distribuição hipotética de temperatura**

$$h_T = \frac{1}{2}(S_1 - S_2) \cdot \left[ 2(h_3 - h_2) - (h_2 - h_1) - \frac{(h_3 - h_5)^2}{h_6 - h_5} \right] \quad (3.1)$$

onde  $h_T$  é o ganho-termossifão,  $h_x$  são diferentes alturas do sistema (Fig. 3.1) e  $S$  é uma aproximação parabólica da densidade específica da água dada por,

$$S = AT^2 + BT + C \quad (3.2)$$

Na Eq. 3.2,

$$A = -4,05 \cdot 10^{-6} \text{ [}^\circ\text{C}^{-2}\text{]}; B = -3,906 \cdot 10^{-5} \text{ [}^\circ\text{C}^{-1}\text{]}; C = 1,00026[-] \quad (3.3)$$

Definindo,

$$g(h) = 2(h_3 - h_2) - (h_2 - h_1) - \frac{(h_3 - h_5)^2}{h_6 - h_5} \quad (3.4)$$

tem-se,

$$h_T = \frac{1}{2}(S_1 - S_2) \cdot g(h) \quad (3.5)$$

O ganho-termossifão nos ascensores (entre os pontos 1 e 2 da Fig. 3.1) é calculado usando a média entre as temperaturas de entrada e saída do coletor, assumindo que a variação de temperatura ao longo da altura do coletor seja linear. Essa hipótese foi investigada posteriormente por Zvirin *et al.* (1977). Zvirin propõe um método para a solução da equação diferencial de energia e da equação da conservação da quantidade de movimento linear acoplada para a obtenção da distribuição de temperatura em regime permanente para o sistema termossifão (coletor + tanque). O modelo matemático desenvolvido somente é válido próximo ao meio-dia, quando todos os componentes já estão aquecidos e a variação do fluxo de calor incidente é pequena. O coeficiente de transferência de calor, assim como as propriedades do fluido, são consideradas constantes. Apenas o termo de empuxo considera a dependência da temperatura (aproximação de Boussinesq). Resultados da análise mostraram que a aproximação linear da distribuição de temperatura é considerada satisfatória para valores típicos de parâmetros construtivos e operacionais, fornecendo estimativas para o fluxo de massa que diferem entre 5% a 10% das estimativas do modelo mais exato.

As perdas por fricção são calculadas pela Eq. (3.6), de Darcy-Weisbach,

$$h_f = \frac{f_D L V^2}{2gD} + \frac{kV^2}{2g} \quad (3.6)$$

onde  $h_f$  é a altura manométrica da coluna de água cuja pressão equivale à perda de carga por fricção,  $f_D$  é o fator de fricção de Darcy,  $L$  é o comprimento do tubo,  $k$  é um coeficiente de perda de carga localizada,  $V$  é a velocidade média no tubo,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $D$  é o diâmetro do tubo.

Finalmente, a solução é obtida a partir de,

$$h_T = h_f \quad (3.7)$$

e das equações da energia para o coletor e o tanque,

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{LC} + \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (3.8)$$

$$\dot{m} c_p (T_2 - T_1) = \dot{Q}_{LT} + C \frac{dT_M}{dt} \quad (3.9)$$

$$T_M = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3.10)$$

onde  $\dot{Q}_C$  é a taxa de calor absorvido no coletor,  $\dot{Q}_{LC}$  é a taxa de perdas do coletor para o ambiente,  $\dot{Q}_{LT}$  é taxa de perda de calor do reservatório térmico para o ambiente,  $\dot{m}$  é a vazão mássica,  $c_p$  é o calor específico a pressão constante,  $C$  é a capacitância térmica do conjunto tanque + água,  $T_2$  é a temperatura na saída do coletor,  $T_1$  é a temperatura na entrada do coletor e  $T_M$  é a temperatura média do sistema.

Nessa solução não é considerado consumo de água quente e, portanto, sua aplicação é limitada, porém importante como marco inicial do estudo do circuito termosifão. A correlação para a densidade específica (Eqs. 3.2 e 3.3) ainda é usada atualmente.

Ong (1974), usando o trabalho de Close (1962) como ponto de partida, propõe um método de diferenças finitas no tempo para a resolução do problema, ao invés de integrar a equação diferencial parcial da temperatura média do sistema admitindo valores constantes de propriedades físicas da água, coeficientes de transferência de calor entre a água e os tubos do coletor, fatores de fricção e perdas térmicas do coletor. Essas variáveis mudam com a temperatura e a vazão mássica do circuito em cada instante de tempo. Assim, resultados mais precisos são alcançados e é possível também usar valores de temperatura ambiente e irradiação solar medidos, no lugar de curvas ajustadas empiricamente. É importante ressaltar que nessa análise, assim como no trabalho de Close (1962), a temperatura média no coletor e no reservatório térmico é a mesma e igual à temperatura média do sistema  $T_M$ . Os resultados obtidos experimentalmente mostram que essa simplificação, apesar de prever a vazão mássica, assim como a temperatura média do sistema razoavelmente bem para o principal período de insolação, não é satisfatória para o começo e fim do dia.

Em um trabalho posterior, Ong (1976) faz uma ruptura com a metodologia que vinha sendo empregada em estudos anteriores. O circuito de termossifão passa a ser dividido em seções e um balanço de energia é aplicado a cada seção. O coletor e os tubos de conexão são considerados seções únicas, sendo que o reservatório é dividido em  $N$  seções adjacentes. Assim, a hipótese de um perfil linear de temperatura no reservatório é abandonada, porém mantida no coletor. Nos tubos de conexão as perdas são desconsideradas. Da mesma forma que nos trabalhos anteriores, a igualdade entre as perdas por fricção e o ganho-termossifão (Eq. 3.7) é empregada para completar o sistema de equações necessário para resolver o problema. A comparação entre os resultados previstos pelo novo método de solução e os resultados experimentais mostrou uma concordância muito melhor daquela obtida com o modelo anterior. As maiores discrepâncias ainda eram observadas no começo e fim do dia, fato atribuído à não consideração das capacitâncias térmicas do vidro, isolamento e ar enclausurado no coletor, ao efeito do ângulo de incidência sobre a transmissividade do vidro (admitido constante), e às condições iniciais impostas, que podem não ter descrito o sistema real adequadamente. O modelo de Ong ainda não contemplava o consumo de água do reservatório térmico.

Morrison & Ranatunga (1980a, 1980b) usaram a técnica de anemometria Laser-Doppler para a medição da velocidade do escoamento no circuito termossifão e os compararam a resultados teóricos e experimentais de outros autores. Os autores fazem uma revisão da análise feita por Close (1962), questionando a hipótese do escoamento laminar plenamente desenvolvido, afirmando que o escoamento nos tubos de conexão do coletor será quase sempre não-desenvolvido, pois os tubos de conexão são mantidos os mais curtos possíveis. Assim, o fator de fricção é provavelmente influenciado em todos os segmentos do tubo pelo regime não-desenvolvido do escoamento. O fator de fricção é adicionalmente influenciado pela transferência de calor da parede do tubo, podendo causar diferenças significativas entre os gradientes de velocidade na seção motriz do circuito de termossifão e na seção não-aquecida do escoamento não-desenvolvido. Outro aspecto importante é que no escoamento de termossifão nos ascensores a densidade  $e$ , portanto o ganho-termossifão, depende primordialmente da distribuição de temperatura ao longo da seção transversal do tubo (média espacial) e não da temperatura média do escoamento. Nos tubos de conexão o escoamento é bem misturado e, portanto, a densidade pode ser calculada com base na temperatura média do escoamento. Por outro lado, nos ascensores a densidade do fluido deve ser computada integrando a temperatura sobre a seção transversal e comprimento dos mesmos.

Como a anemometria Laser-Doppler fornece a velocidade em um ponto do escoamento, a seção transversal foi “varrida” para verificar a existência do perfil parabólico característico do escoamento laminar. Em seguida, mediu-se a velocidade na linha de centro do escoamento e a relação teórica entre esta e a vazão mássica foi usada. Os resultados obtidos com a combinação da anemometria Laser-Doppler e o perfil teórico estão entre 2% dos valores obtidos fazendo a medição através da coleta do fluido dos ascensores.

Resultados mostram que o cálculo da perda de carga supondo o escoamento como laminar e plenamente desenvolvido é inadequado. O fator de fricção é corrigido usando a Eq. 3.11 proposta por Langhaar (1942),

$$f_D^* = \frac{64}{\text{Re}_D} \cdot \left[ 1.0 + \frac{0.038}{\left( \frac{L}{D \cdot \text{Re}_D} \right)^{0.96}} \right] \quad (3.11)$$

onde  $f_D^*$  é o fator de fricção de Darcy para escoamento não desenvolvido e  $\text{Re}_D$  é o número de Reynolds baseado no diâmetro do tubo.

Em mudanças de seção do escoamento, fatores de perda de carga para o escoamento laminar desenvolvido devem ser usados (até aquele momento relações para o escoamento turbulento eram usadas), melhorando a concordância entre valores previstos e medidos para números de Reynolds elevados.

Usando o perfil de temperatura para escoamento plenamente desenvolvido com fluxo de calor constante no cálculo da densidade média na saída dos ascensores, a discrepância entre valores teóricos e experimentais é reduzida para Reynolds baixos ( $< 300$ ). No entanto, para Número de Reynolds elevado, o desvio entre valores teóricos e experimentais aumenta, pois não se tem regime desenvolvido na seção de saída. O aprimoramento das correções adotadas depende do conhecimento mais profundo da estrutura do escoamento termossifão. Para Reynolds baixo, a suposta condição de convecção forçada pode não ser justificada, e o perfil de velocidade pode apresentar um máximo próximo à parede do tubo com uma região de recirculação no centro.

Morrison & Tran (1984) elaboraram um modelo de simulação de elementos finitos adotando a correção para o escoamento laminar não-desenvolvido proposta anteriormente (Morrison & Ranatunga, 1980b) e um modelo convectivo de reservatório térmico no lugar do modelo totalmente estratificado. No modelo convectivo, a água quente do coletor é misturada de forma homogênea com as camadas de fluido existentes entre o nível de retorno e a camada de fluido com temperatura mais próxima, aqui chamada de "camada de equilíbrio". Um resistor para aquecimento auxiliar é incluído no modelo, que é capaz de simular tanques verticais ou horizontais. Assim como no trabalho de Ong (1976), os tubos de conexão são modelados como elementos únicos e um perfil linear de temperatura é assumido no coletor. A inércia térmica do coletor e tubos de conexão não foi modelada, pois um estudo anterior (Morrison & Ranatunga, 1980a) mostrou que retardos temporais devido à capacitância térmica têm efeitos desprezíveis na eficiência do sistema termossifão. Para a obtenção de resultados consistentes, foi necessário dividir o tanque em um número muito maior de segmentos (20 a 30) do que vinha sendo empregado (5 a 10) por outros pesquisadores. A validade do modelo de simulação foi determinada comparando valores teóricos previstos e medidos do perfil de temperaturas no tanque durante um período de seis dias e comparando valores mensais de fração solar durante um período de um a dois anos. Concordância razoavelmente boa foi observada nos dois casos.

Todos os avanços obtidos nos trabalhos descritos acima culminaram com a publicação do artigo *System Modeling and Operation Characteristics of Thermosyphn Solar Water Heaters* (Morrison & Braun, 1985), que apresenta o modelo de coletor solar com reservatório térmico integrado usado no software TRNSYS.

### ***3.2 Modelo do coletor solar com reservatório térmico integrado do TRNSYS***

O artigo de Morrison & Braun (1985), apresenta o detalhamento do modelo desenvolvido para sistemas de aquecimento solar por termossifão com reservatório térmico vertical ou horizontal integrado. Assim como nos trabalhos de Ong (1974, 1976), o sistema é dividido em um número  $N$  de segmentos normais à direção do fluxo e a equação de Bernoulli para escoamento incompressível é aplicada a cada segmento. Para a condição de regime permanente, a queda de pressão em qualquer segmento é dada pela Eq.3.12,

$$\Delta P_i = \rho_i g h_{f_i} + \rho_i g H_i \quad (3.12)$$

onde  $\Delta P_i$  é a variação de pressão,  $\rho_i$  é a densidade média e  $H_i$  é a altura do  $i$ -ésimo segmento.

Adicionalmente, a soma das variações de pressão em todo o circuito é nula, Eq. 3.13.

$$\sum_{i=1}^N \rho_i h_{fi} = \sum_{i=1}^N \rho_i H_i \quad (3.13)$$

Para cada intervalo de tempo, o escoamento do circuito termossifão deve satisfazer a Eq. 3.13. A densidade de cada nó é calculada em função da temperatura local de acordo com as Eqs. 3.2 e 3.3 propostas no trabalho de Close (1962). A distribuição de temperatura e as perdas de carga por fricção em cada nó do coletor e tubos de conexão são determinadas conforme descrição a seguir.

Os tubos de conexão são considerados como nós únicos com capacitância térmica desprezível. Um balanço de energia nos tubos de conexão fornece a Eq. 3.14 para a temperatura média do tubo e a Eq. 3.15 para a temperatura de saída,

$$\bar{T}_p = T_a + (T_{pi} - T_a) \frac{\dot{m} c_p}{(UA)_p} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{(UA)_p}{\dot{m} c_p} \right] \right\} \quad (3.14)$$

$$T_{po} = T_a + (T_{pi} - T_a) \cdot \exp \left[ - \frac{(UA)_p}{\dot{m} c_p} \right] \quad (3.15)$$

onde  $\bar{T}_p$  é a temperatura média ao longo do tubo,  $T_{pi}$  é a temperatura de entrada no tubo,  $T_{po}$  é a temperatura de saída do tubo e  $(UA)_p$  é o coeficiente global de transferência de calor do tubo.

As perdas de carga por fricção nos tubos são avaliadas pela Eq. 3.16,

$$h_f = \frac{f_D L V^2}{2gD} + \frac{kV^2}{2g} \quad (3.16)$$

$$f_D = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad \text{para } \text{Re}_D \leq 2000 \quad (3.17)$$

$$f_D = 0,032 \quad \text{para } \text{Re}_D > 2000 \quad (3.18)$$

A queda de pressão no coletor pode ser calculada internamente ao programa, ou um arquivo contendo dados sobre a queda de pressão versus vazão mássica para o coletor pode ser usado. No segundo caso os dados não são ajustados para a mudança da viscosidade da água com a temperatura.

A perda de carga em cada seção do circuito termossifão é calculada usando os seguintes valores para os comprimentos equivalentes e coeficientes de perda de carga localizados.

1. Saída do reservatório térmico para o tubo que leva água ao coletor

$$k = 0,5 \quad (3.19)$$

2. Escoamento não-desenvolvido nos tubos de conexão e nos ascensores (caso dados sobre perda de carga versus vazão mássica não sejam fornecidos), conforme a Eq. 3.11.

$$f_D^* = \frac{64}{\text{Re}_D} \cdot \left[ 1,0 + \frac{0,038}{\left( \frac{l}{D \cdot \text{Re}_D} \right)^{0,96}} \right] \quad (3.20)$$

3. Perdas devido a curvas nos tubos de conexão

- (a) Curva de 90°

$$L_{eq} = L + 30 \cdot D \quad \text{para } \text{Re}_D \leq 2000$$

$$k = 1,0 \quad \text{para } \text{Re}_D > 2000. \quad (3.21)$$

- (b) Curva de 45°

$$L_{eq} = L + 20 \cdot D \quad \text{para } \text{Re}_D \leq 2000$$

$$k = 0,6 \quad \text{para } \text{Re}_D > 2000. \quad (3.22)$$

4. Mudança da área de seção transversal na junção dos tubos de conexão e cabeçotes (e entrada do ascensor assim como saída do mesmo para o cabeçote se dados de fricção não são fornecidos).

(a) Expansão súbita

$$k = 0,667 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 2,667 \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 + 2,0 \quad (3.23)$$

onde  $D_1$  é o diâmetro de entrada e  $D_2$  é o diâmetro de saída.

(b) Redução súbita

$$k = -0,3259 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4 - 0,1784 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 + 0,5 \quad (3.24)$$

5. Perda de carga no coletor é dada pela média da queda de pressão ao longo dos cabeçotes de entrada e saída para vazões mássicas iguais em cada ascensor.

$$S_1 = \sum_{i=1}^{N_R} \frac{(N_R - i + 1)}{N_R^2} \quad (3.25)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^{N_R} \frac{(N_R - i + 1)^2}{N_R^2} \quad (3.26)$$

$$A_{11} = A_{12} = \frac{f_D L_h V_h^2}{2D_h}$$

$$f_D = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad \text{baseado na temperatura e velocidade} \quad (3.27)$$

de entrada no cabeçote

$$A_1 = \frac{\rho V_h^2}{2} \quad (\text{baseado na temperatura e velocidade no cabeçote de entrada}) \quad (3.28)$$

$$A_2 = \frac{\rho V_h^2}{2} \text{ (baseado na temperatura e velocidade no cabeçote de saída)} \quad (3.29)$$

$$P_h = \frac{-S_1 A_{11} \rho + S_1 A_{12} \rho + S_2 (A_1 + A_2)}{2} \quad (3.30)$$

Nas Eqs. 3.25 a 3.30,  $S_1$  e  $S_2$  são coeficientes que modelam a distribuição uniforme da vazão mássica nos ascensores,  $N_R$  é o número de ascensores,  $A_{11}$  e  $A_{12}$  são termos que representam a perda de carga ao longo do cabeçotes, o índice  $h$  refere-se ao cabeçote e  $P_h$  é a perda de carga total nos cabeçotes do coletor.

#### 6. Perda de carga na entrada do escoamento dentro do reservatório térmico

$$k = 1 \quad (3.31)$$

A perda de carga por fricção no tanque é desprezada.

### 3.2.1 Desempenho térmico do coletor e o ganho-termossifão

O desempenho térmico é modelado de acordo com a equação de Hottel-Whillier, Eq. 3.32. A temperatura no ponto central de qualquer nó,  $T_k$ , é expressa por:

$$T_k = T_a + \frac{I_T F_R (\tau \alpha)}{F_R U_L} + \left[ T_{ci} - T_a - \frac{I_T F_R (\tau \alpha)}{F_R U_L} \right] \cdot \exp \left[ \frac{A_c F' U_L}{\dot{m} \cdot c_p} \cdot \frac{(k-1/2)}{N_x} \right] \quad (3.32)$$

onde  $I_T$  é a irradiação solar incidente em plano inclinado,  $F_R$  é o fator de remoção de calor do coletor (definido abaixo),  $\tau$  é a transmissividade da cobertura do coletor,  $\alpha$  é a absorptividade da placa do coletor,  $U_L$  é o coeficiente de transferência de calor do coletor para o ambiente,  $A_c$  é a área da placa coletora,  $T_{ci}$  é a temperatura na entrada do coletor,  $F'$  é o fator de eficiência de aleta do coletor e  $N_x$  é o número total de nós em que o coletor é dividido.

O parâmetro  $F'U_L$  é calculado a partir de  $F_R U_L$  e  $\frac{\dot{m}}{A_c}$  nas condições de teste do coletor,

$$F'U_L = -\frac{\dot{m}_{teste} \cdot C_P}{A_c} \ln \left( 1 - \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m}_{teste} C_P} \right) \quad (3.33)$$

$$F' = \frac{q'_u}{W \cdot [S - U_L(T_f - T_a)]} \quad (3.34)$$

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot c_P (T_{co} - T_{ci})}{A_c [S - U_L(T_{ci} - T_a)]} \quad (3.35)$$

onde  $q'_u$  é a taxa de calor útil por unidade de comprimento na direção do fluxo entregue ao fluido de trabalho (ganho menos perdas),  $W$  é a largura da placa coletora,  $T_{ci}$  é a temperatura do fluido na entrada do coletor,  $T_{co}$  é a temperatura do fluido na saída do coletor,  $T_f$  é a temperatura local do fluido no coletor e  $S$  é a irradiação solar absorvida por unidade de área.

Esse procedimento desconsidera variações em  $F'$  e  $U_L$  devido a mudanças no coeficiente de transferência de calor do fluido. O parâmetro  $F_R(\tau\alpha)$  é determinado a partir abscissa da curva de eficiência a incidência normal  $F_R(\tau\alpha)_n$ , usando o coeficiente de modificação do ângulo de incidência,  $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ . Em geral,

$$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} = \frac{I_{bT} \cdot \frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} + I_d \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \frac{(\tau\alpha)_s}{(\tau\alpha)_n} + I_g \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \cdot \frac{(\tau\alpha)_g}{(\tau\alpha)_n}}{I_T} \quad (3.36)$$

onde o índice  $bT$  refere-se à irradiação solar direta em plano inclinado,  $b$  refere-se à direção de incidência da radiação direta,  $n$  refere-se à direção normal,  $s$  refere-se à direção de incidência da radiação difusa do céu,  $d$  refere-se à irradiação difusa do céu,  $g$  refere-se à irradiação difusa refletida pela superfície terrestre e à direção de incidência dessa radiação e  $\beta$  é o ângulo de inclinação do coletor solar em relação à horizontal.

O coeficiente de modificação do ângulo de incidência para a irradiação direta é dado em termos do ângulo de incidência e uma constante  $b_0$ , obtida através de procedimento de teste padrão de placas coletoras (ISO, 1994),

$$\frac{(\tau\alpha)_b}{(\tau\alpha)_n} = 1 - b_0 \left( \frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \quad (3.37)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de incidência, definido como sendo o ângulo entre a normal ao plano e a direção de incidência da irradiação.

Para a irradiação difusa do céu e refletida pela superfície terrestre, os coeficientes de modificação do ângulo de incidência também são determinados usando a Eq. 3.37, porém em ângulos de incidência efetivos definidos por Brandemuehl & Beckman (1980).

Para a irradiação difusa refletida da superfície terrestre o ângulo efetivo de incidência é dado por,

$$\theta_e = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2 \quad (3.38)$$

Para a radiação difusa do céu o ângulo efetivo de incidência é dado por,

$$\theta_e = 59,68 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2 \quad (3.39)$$

A energia útil coletada é fornecida pela Eq. 3.40,

$$\dot{Q}_u = rA_c [F_R(\tau\alpha)I_T - F_R U_L (T_{ci} - T_a)] \quad (3.40)$$

onde  $r$  é expressa pela Eq. 3.41.

$$r = \frac{F_R |_{uso}}{F_R |_{teste}} = \frac{\frac{\dot{m}}{A_c} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_c F' U_L}{\dot{m} \cdot c_p}\right) \right]}{\frac{\dot{m}_{teste}}{A_c} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_c F' U_L}{\dot{m}_{teste} \cdot c_p}\right) \right]} \quad (3.41)$$

Aplicando um balanço de energia no coletor, é possível calcular a temperatura de saída do mesmo, Eq. 3.42,

$$T_{co} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m} \cdot c_p} + T_{ci} \quad (3.42)$$

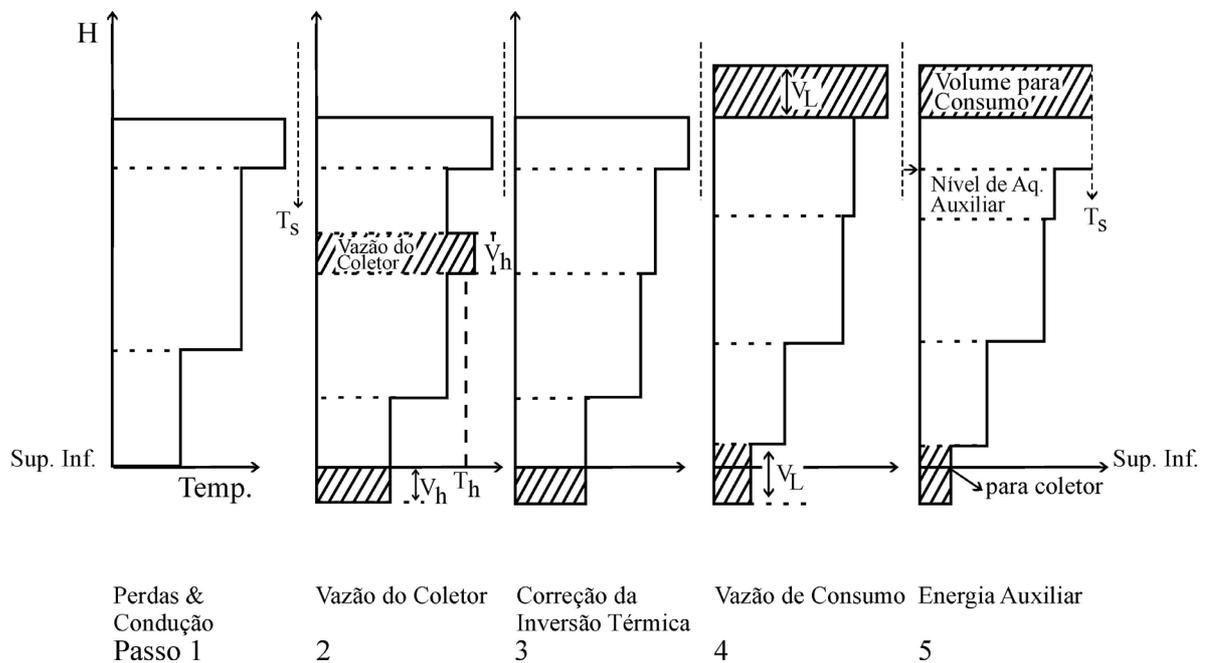
### 3.2.2 Modelo de Reservatório Térmico *Plug-Flow*

O método de solução para o reservatório térmico é ilustrado na Fig. 3.2. Neste exemplo, o reservatório térmico é inicialmente representado por três segmentos de fluido. A primeira etapa do método consiste em calcular as mudanças de temperatura de cada segmento do reservatório térmico devido à perda de calor para o ambiente e à condução entre os segmentos de fluido. O ganho de energia da água vindo do coletor é determinado considerando uma porção de fluido à temperatura constante, de volume  $V_h (= \dot{m} \Delta t / \rho)$  entrando no reservatório durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ . A porção do fluido é posicionada em relação aos segmentos de fluido existentes usando um dos seguintes modelos de convecção:

- (a) Modelo de convecção de entrada fixa: A porção do fluido de volume  $V_h$  e temperatura  $T_h$  é inicialmente inserido no reservatório térmico abaixo da posição física do tubo de entrada. Segmentos abaixo deste ponto são movidos para a parte inferior do tanque por uma quantidade equivalente à retirada de fluido para consumo, durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  (passo 2 da Fig. 3.2). Se uma inversão de temperatura é produzida por esse processo, o novo segmento de fluido é misturado com segmentos localizados acima ou abaixo deste, até que a inversão seja removida (passo 3 da Fig. 3.2).
- (b) Modelo de convecção totalmente estratificado: A porção de fluido entrando o reservatório é posicionada entre os segmentos de fluido existentes de forma a

evitar uma inversão de temperaturas. Este modelo reproduz o nível máximo de estratificação possível.

O fluxo de consumo é considerado em termos de uma outra porção de fluido de volume  $V_L (= \dot{m}_L \Delta t / \rho)$  e temperatura  $T_L$  adicionado na porção inferior do reservatório térmico (modelo de convecção de entrada fixa) ou no seu nível correspondente de temperatura (modelo de convecção totalmente estratificado). Segmentos de fluido são deslocados em direção à parte superior do reservatório térmico como resultado da adição do novo segmento de consumo. O deslocamento líquido do perfil do reservatório térmico acima do nível do retorno do coletor é igual ao volume de consumo  $V_L$ , e abaixo do retorno do coletor é igual à diferença entre os volumes do coletor e de consumo  $(V_h - V_L)$  (passo 4 da Fig. 3.2). Após ajustar para o fluxo de consumo, a energia auxiliar é considerada, e se energia suficiente estiver disponível, segmentos acima do nível do elemento de aquecimento auxiliar no reservatório térmico são aquecidos até a temperatura programada no termostato (passo 5 da Fig. 3.2). Se necessário, o segmento contendo o elemento de aquecimento auxiliar é dividido para que somente segmentos acima deste sejam aquecidos.



**Fig. 3.2 Método de solução do modelo de reservatório térmico *plug-flow* (Morrison & Braun, 1985).**

Segmentos e frações de segmentos no novo perfil do reservatório térmico que estiverem fora dos limites do reservatório térmico são direcionados ao coletor e para consumo (passo 5 da Fig. 3.2). A temperatura média do fluido consumido é dada pela Eq.3.43.

$$T_D = \frac{1}{V_L} \cdot \left[ aT_{N_L}V_{N_L} + \sum_{i=1}^{N_L-1} T_iV_i \right] \quad (3.43)$$

onde  $N_L$  é o segmento dividido pelo limite superior do reservatório térmico.  $a$  e  $N_L$  satisfazem a Eq. 3.44.

$$V_L = aV_j + \sum_{i=1}^{j-1} V_i \quad \text{e} \quad 0 \leq a < 1 \quad (3.44)$$

A temperatura média do fluido direcionado ao coletor é dada pela Eq. 3.45.

$$T_R = \frac{1}{V_h} \cdot \left[ bT_{N_r}V_{N_r} + \sum_{i=N_r+1}^{N_T} T_iV_i \right] \quad (3.45)$$

onde  $N_r$  é o segmento dividido pelo limite inferior do reservatório térmico.  $N_r$  e  $b$  satisfazem a Eq. 3.46.

$$V_R = bV_{N_r} + \sum_{i=N_r+1}^{N_T} V_i \quad \text{e} \quad 0 \leq b < 1 \quad (3.46)$$

A vantagem principal deste modelo de reservatório térmico é que segmentos pequenos de fluido são introduzidos quando a estratificação está em desenvolvimento, enquanto zonas de temperatura uniforme, como aquelas acima do elemento de aquecimento auxiliar, são representadas por segmentos grandes de fluido. O tamanho dos segmentos de fluido usados para representar a estratificação do reservatório térmico varia com a vazão no coletor. Se a vazão no coletor é alta, haverá pouca estratificação na porção de pré-aquecimento do reservatório térmico e o modelo produzirá apenas alguns segmentos de fluido. No entanto, se a vazão no coletor for baixa e o reservatório térmico estiver estratificado, então pequenos segmentos de fluido serão gerados. O tamanho dos segmentos de fluido também diminui com a redução do passo no tempo da simulação. Para evitar a geração de um número excessivo de

segmentos, segmentos adjacentes são misturados se tiverem uma diferença de temperatura menor que  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.3 Procedimento de solução

O procedimento de solução consiste inicialmente em estabelecer um perfil de temperaturas ao longo do circuito de termossifão para a vazão do passo de tempo anterior. A temperatura do fluido de entrada no coletor é calculada a partir da Eq. 3.45. Após o cálculo das perdas térmicas no tubo de conexão que leva água ao coletor (Eq. 3.15) a temperatura de cada um dos nós do coletor é usada para representar o perfil de temperaturas no coletor, através da Eq. 3.32. A temperatura do novo segmento de fluido devolvido ao reservatório térmico é calculada a partir da temperatura de saída do coletor e a queda de temperatura no tubo de conexão levando água do coletor ao reservatório térmico. O novo perfil de temperaturas do reservatório térmico é então calculado.

A diferença de pressão causada pelo gradiente no perfil de temperatura ao longo do circuito termossifão é calculada e comparada com a diferença de pressão calculada por fricção para a vazão inicial e também para uma segunda vazão. A diferença líquida entre as quedas de pressão (por efeito termossifão e atrito), assim como as duas vazões, são então usadas para estimar uma nova vazão. O processo é repetido até que a queda de pressão calculada seja igual, seja ela calculada pelo gradiente de temperatura ou por efeitos viscosos. A redução do intervalo de tempo das simulações de 1h para 0,1h resultou em diferenças de apenas 1% a 2% na fração solar mensal  $f$  (Morrison & Braun, 1985).

A validação no trabalho de Morrison & Braun consistiu na medição da temperatura em três posições no reservatório térmico, na entrada e saída do coletor e na medição da vazão no coletor. Discrepâncias são observadas no início do dia, uma vez que o modelo não contempla a capacitância térmica do coletor. Como a vazão durante esta hora do dia é baixa, o efeito sobre a energia diária útil absorvida é pequeno. Os valores de vazão medidos e previstos pelo modelo estão dentro da incerteza de 10% do sistema de medição utilizado. Dados de desempenho ao longo de um ano mostram uma diferença máxima de 6% entre valores previstos e medidos da fração solar mensal.

A diferença entre os modelos de estratificação total e entrada fixa é acentuada a baixas vazões, quando os efeitos de condução de calor entre porções adjacentes de fluido são mais

acentuados. A condução de calor para a parte inferior do tanque aumenta a temperatura média de entrada do fluido no coletor, diminuindo o calor absorvido pela placa coletora. Em altas vazões o efeito de condução é menor e ambos os modelos fornecem resultados muito próximos. Em vazões muito baixas, o modelo de estratificação total produz uma camada de fluido muito quente na parte superior do tanque, aumentando as perdas de tal maneira que a fração solar fornecida por este modelo passa a ser menor que a fornecida pelo modelo de entrada fixa.

Investigando a influência do perfil de consumo de água quente sobre a fração solar de sistemas compactos com tanque horizontal, resultados mostram que um perfil noturno fornece a menor fração solar. Isto porque, com as altas temperaturas atingidas durante o dia, os efeitos de condução da parte superior do tanque para a inferior são acentuadas, aumentando a temperatura média de entrada no coletor e assim prejudicando o rendimento do mesmo. É importante observar que o sistema investigado pelos autores possui um elemento de aquecimento auxiliar no reservatório térmico, elemento este que está desligado no presente estudo.

Oliveski *et al.* (2003) fizeram uma comparação entre o desempenho de um modelo bidimensional proposto e modelos unidimensionais de múltiplos nós. Os autores chegaram à conclusão de que, em face da boa concordância do perfil de temperatura obtido pelos modelos unidimensionais com o perfil experimental e do desempenho computacional superior dos modelos unidimensionais, não há razão em utilizar modelos bidimensionais na simulação anual de sistemas de aquecimento solar.

Kleinbach *et al.* (1993) fizeram uma análise do desempenho entre dois modelos de reservatório térmico do tipo *plug-flow* e um modelo de múltiplos nós, ambos unidimensionais. As variáveis de desempenho consideradas eram relacionadas com a capacidade de o modelo em prever a quantidade de energia entregue para consumo,  $QD$ , a quantidade de energia devolvida à fonte quente (no caso o coletor),  $QI$ , e com o desvio entre a temperatura de retorno simulada e aquela obtida experimentalmente,  $P$ . Os resultados mostraram que os modelos tipo *plug-flow* são computacionalmente mais eficientes que modelos multinodais, embora tendam a superestimar quantidades de energia. O erro relativo do modelo *plug-flow* de entradas fixas para as variáveis de performance  $QD$  e  $QI$  foi de 5% a 7%. Já para a variável  $P$ , o valor obtido foi de aproximadamente 0,017.

### 3.3 Sistemas periféricos

O coletor solar com reservatório térmico integrado é o principal componente da simulação. No entanto, diversos sistemas periféricos completam o sistema, sendo modelados matematicamente no TRNSYS como descrito a seguir.

#### 3.3.1 Cálculo da irradiação solar incidente em plano inclinado

O processador de irradiação solar calcula, usando diversos modelos disponíveis na literatura, a irradiação total em um plano inclinado, com inclinação e orientação especificadas, a partir de médias horárias de irradiação direta, difusa e total em superfície horizontal. No presente trabalho, o modelo de Perez *et. al* (1988) é adotado, de acordo com a recomendação de Reindl *et al.* (1990), que comparou cinco modelos de cálculo de irradiação solar em plano inclinado. Os modelos diferem exclusivamente no tratamento da irradiação difusa, sendo que o modelo de Perez foi o que apresentou o melhor desempenho. Nesse modelo (Perez *et al.*, 1988), a irradiação total em plano inclinado é dada pela Eq. 3.47.

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b} + I_d F_2 \sin \beta + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.47)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.48)$$

$$a = \max[0, \cos \theta] \quad (3.49)$$

$$b = \max[\cos(85^\circ), \cos \theta_z] \quad (3.50)$$

$$F_1 = \max \left[ 0, \left( f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{13} \right) \right] \quad (3.51)$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{23} \quad (3.52)$$

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}} \quad (3.53)$$

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3.54)$$

Os valores de  $f_{11}$ ,  $f_{12}$ ,  $f_{13}$ ,  $f_{21}$ ,  $f_{22}$  e  $f_{23}$  são obtidos a partir da seguinte Tab. 3.1.

**Tab. 3.1 Coeficientes de brilho para o modelo anisotrópico de Perez *et al.* (1988).**

Faixa de $\varepsilon$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
0,000 – 1,065	-0,196	1,084	-0,006	-0,114	0,180	-0,019
1,065 – 1,230	0,236	0,519	-0,180	-0,011	0,020	-0,038
1,230 – 1,500	0,454	0,321	-0,255	0,072	-0,098	-0,046
1,500 – 1,950	0,866	-0,381	-0,375	0,203	-0,403	-0,049
1,950 – 2,800	1,026	-0,711	-0,426	0,273	-0,602	-0,061
2,800 – 4,500	0,978	-0,986	-0,350	0,280	-0,915	-0,024
4,500 – 6,200	0,748	-0,913	-0,236	0,173	-1,045	0,065
6,200 - ↑	0,318	-0,757	0,103	0,062	-1,698	0,236

Onde  $\varepsilon$  é dado pela Eq. 3.55,

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_{bn}}{I_d} + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3} \quad (3.55)$$

Nas equações acima  $R_b$  representa a razão entre a irradiação solar direta em plano inclinado e no plano horizontal,  $\theta_z$  é o ângulo de azimute solar,  $\rho_g$  é o albedo do solo,  $F_1$  é um coeficiente de brilho circumsolar,  $F_2$  é um coeficiente de brilho do horizonte,  $a$  e  $b$  são termos que levam em consideração os ângulos de incidência do cone de irradiação circumsolar,  $\varepsilon$  é o índice de clareza,  $\Delta$  é o brilho,  $m$  é uma aproximação da razão entre a espessura da atmosfera percorrida por uma raio incidindo ao ângulo  $\theta_z$  e a espessura a um ângulo  $\theta_z = 0^\circ$ , o índice  $on$  refere-se à direção de incidência normal à irradiação extraterrestre e  $f_{xy}$  são coeficientes de brilho.

### 3.3.2 Sistema auxiliar de aquecimento de passagem

O sistema auxiliar de aquecimento tem a função de modelar o chuveiro elétrico com ajuste contínuo de potência. Respeitando o limite da potência máxima especificada, o sistema

de aquecimento de passagem eleva a temperatura do fluido do trabalho até a temperatura dada pelo parâmetro  $T_{set}$ . O rendimento do sistema também deve ser especificado.

### **3.3.3 Curva de Demanda**

A curva de demanda é usada para simular os diferentes perfis de consumo de água quente. Perfis podem ser especificados para diferentes dias da semana e constituem funções cíclicas dependentes do tempo. A curva de demanda é dada por um conjunto de intervalos de duração de consumo de água quente e o valor de vazão associado ao intervalo.

### **3.3.4 Sistema de Mistura**

O sistema de mistura possui a função de modelar uma válvula de mistura termostática. Quando a água vinda do coletor estiver a uma temperatura mais elevada do que a ajustada na válvula, esta então fará a mistura de água fria com quente para atingir a temperatura especificada. Na prática, a válvula de mistura termostática previne queimaduras, assim como o desperdício de água quente do sistema.

### **3.3.5 Tubulação**

Este modelo calcula a temperatura de saída do fluido de trabalho, dada a temperatura de entrada, a temperatura ambiente e o coeficiente global de transferência de calor, de acordo com a Eq. 3.15.

## **3.4 Metodologia de validação**

A metodologia de validação adotada é baseada nos trabalhos de Morrison & Braun (1985), Kleinbach *et al.* (1993) e Kalogirou & Papamarcou (2000). O modelo do coletor solar com reservatório térmico integrado do TRNSYS é confrontado com dados experimentais para as grandezas indicadas na Tab. 3.2.

**Tab. 3.2 Grandezas validadas no modelo do coletor solar com reservatório térmico integrado do TRNSYS**

Variável	Descrição
$T_H$	Temperatura de saída do reservatório térmico para o coletor
$T_R$	Temperatura de retorno do coletor
$T_D$	Temperatura de consumo
$\Delta E$	Variação da energia interna do reservatório térmico
$Q_D$	Calor entregue para consumo

A quantificação dos desvios entre os valores experimentais e simulados é feita através dos seguintes parâmetros:

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{X,ex} - T_{X,si})^2}{N}} \quad (3.56)$$

$$R_X = \frac{\Delta X_{ex} - \Delta X_{si}}{\Delta X_{ex}} \quad (3.57)$$

onde o índice  $X$  é substituído por  $T_H$ ,  $T_R$  e  $T_D$  na Eq.3.56 ou por  $Q_D$  na Eq, 3.57, de acordo com a variável de interesse. O índice  $ex$  refere-se a “experimental”, enquanto o índice  $si$  refere-se a simulado. A variável  $\Delta E$  é apenas mostrada qualitativamente, uma vez que a temperatura média do reservatório térmico não foi obtida experimentalmente.

A comparação entre os dados experimentais e simulados foi realizada de 16/06/2004 a 21/06/2004. As variáveis de entrada do TYPE 45, juntamente com os respectivos intervalos de aquisição e intervalos de média, medidas durante o período de validação, são indicadas na Tab.3.3.

**Tab. 3.3 Variáveis medidas com os respectivos intervalos de aquisição e intervalos de média.**

Símbolo	Descrição	Intervalo de Aquisição	Intervalo de média	Unidade
$I_H$	Irradiação total em superfície horizontal	1s	1min	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_d$	Irradiação difusa em superfície horizontal	1s	1min	[W/m <sup>2</sup> ]
$\theta$	Ângulo de inclinação do coletor solar	[°]		
$\rho_g$	Albedo do solo	[-]		
$T_a$	Temperatura ambiente	1s	1min	[°C]
$T_{mains}$	Temperatura de entrada do sistema (caixa d'água)	5s	1min	[°C]

As variáveis com as quais os valores simulados são confrontados ( $T_H, T_R, T_D$ ) foram coletados em intervalos de 5s e mediados no minuto.

Para assegurar condições iniciais conhecidas, deixou-se água circular pelo reservatório e placa forçadamente durante duas horas antes de cada etapa da validação. Assim, uma temperatura uniforme do sistema é atingida antes do início do período de insolação.

Em um trabalho anterior de validação do TYPE 45, Kalogirou & Papamarcou (2000) usaram apenas a variável  $\Delta T_{RT}$ , definida como sendo a diferença entre a temperatura do reservatório térmico no fim e início do dia, para confrontar os dados experimentais com os simulados. Para o cálculo da temperatura média do reservatório térmico horizontal, os autores retiraram aproximadamente 1 litro de água da porção superior e inferior do reservatório térmico, sendo que a média aritmética das temperaturas foi usada para definir a temperatura média. Com os valores simulados e experimentais de  $\Delta T_{RT}$  em 25 dias distribuídos de maneira uniforme ao longo dos meses de Dezembro de 1998 a Maio de 1999, o erro percentual encontrado foi de 4,68%. Em sua validação, Kalogirou & Papamarcou não realizaram a retirada de água do reservatório para consumo. Essa metodologia, apesar de fornecer a variação total da energia do sistema, não avalia o comportamento do coletor solar e reservatório térmico com consumo de água.

No presente trabalho, o consumo de água quente foi feito de acordo com as datas e horários indicados na Tab. 3.4.

**Tab. 3.4 Programação da retirada de água quente do sistema de aquecimento solar**

Data	Início	Fim	Massa retirada	Vazão mássica média
17/06/2004	16:58:16	17:03:06	29,8 kg	369,93 kg/h
17/06/2004	18:00:01	18:04:32	30,7 kg	407,82 kg/h
17/06/2004	19:00:01	19:04:16	30,0 kg	423,53 kg/h
19/06/2004	13:27:02	13:31:12	29,6 kg	426,24 kg/h
19/06/2004	15:23:07	15:27:17	29,7 kg	427,68 kg/h
19/06/2004	16:42:02	16:46:12	29,8 kg	429,12 kg/h
21/06/2004	09:44:01	09:48:26	31,3 kg	425,21 kg/h
21/06/2004	12:40:01	12:44:16	29,6 kg	417,88 kg/h
21/06/2004	14:49:01	14:53:12	29,6 kg	424,54 kg/h

A retirada de água foi planejada para que o comportamento transiente do sistema de aquecimento solar pudesse ser observado em diferentes situações. No primeiro dia de consumo de água quente (17/06/2004) um perfil noturno foi investigado. Toda a retirada de água é feita após o período de ganho de calor útil do sistema. No segundo dia (19/06/2004) a retirada de água quente ocorre no início da tarde, quando há ganho útil pelo sistema. No terceiro dia de consumo de água quente (21/06/2004), a carga é distribuída na manhã, ao meio-dia e à tarde. Durante a noite dos dias em que água quente foi retirada, o sistema de aquecimento solar foi esvaziado e posteriormente água fria foi circulada para que o mesmo atingisse uma temperatura uniforme. Esse procedimento foi adotado para possibilitar uma comparação independente dos dias simulados. Com o objetivo de observar o comportamento do sistema sem consumo de água quente, não ocorre retirada de água quente em dias consecutivos.

### ***3.5 Descrição do sistema de aquecimento solar e da bancada experimental***

O sistema de aquecimento solar usado no presente trabalho, é composto por uma placa coletora de cobre coberta com tinta seletiva e com cobertura simples integrada a um reservatório térmico localizado logo acima do coletor. O reservatório térmico possui uma proteção em fibra de vidro e é isolado termicamente com lã de vidro. O sistema como um todo possui apenas duas mangueiras de ligação, uma de entrada de água fria e a outra de saída de água quente. A Fig. 3.3 mostra o coletor solar e sua instrumentação. O coletor solar foi testado de acordo com padrões europeus de teste para coletores solares planos (Müller-Steinhagen, 2002), a partir do qual foram obtidos valores de parâmetros usados na simulação do sistema. A Tab. 3.5 resume todos os parâmetros construtivos e operacionais do sistema usados pelo TRNSYS.



**Fig. 3.3 Coletor solar usado na validação experimental. Fabricante: Solares LTDA.**

**Tab. 3.5 Parâmetros construtivos e operacionais do coletor solar e reservatório térmico**

Parâmetro	Símbolo	Valor
Área do coletor	$A_c$	1,36 m <sup>2</sup>
Coefficiente linear da curva de rendimento do coletor	$F_R(\tau\alpha)_n$	0,67
Negativo do coeficiente angular da curva de rendimento do coletor	$F_R U_L$	20,661 kJ/(m <sup>2</sup> hK)
Vazão mássica por área de coletor usada para obtenção da curva de rendimento	$G_{teste}$	60 kg/(m <sup>2</sup> h)
Coefficiente de modificação do ângulo de incidência	$b_0$	0,163
Inclinação do coletor	$\beta$	37°
Número de sensores do coletor	$N_R$	8
Diâmetro dos sensores	$d_R$	14,2 mm
Diâmetro dos cabeçotes	$d_H$	27 mm
Comprimento dos cabeçotes	$H$	0,98 m
Número de nós usados para simular o coletor	$N_x$	30
Altura entre a saída e entrada do coletor	$H_c$	0,82 m
Altura entre a saída do reservatório térmico e a entrada no coletor	$H_o$	1,00 m
Diâmetro do tubo de entrada do coletor	$d_i$	15 mm
Comprimento do tubo de entrada do coletor	$L_i$	1,67 m
Número de joelhos (ou equivalente) no tubo de entrada do coletor	$NB_i$	2,276

Parâmetro	Símbolo	Valor
Coefficiente de transferência de calor do tubo de entrada e isolamento	$U_i$	1,5 kJ/(m <sup>2</sup> hK)
Diâmetro do tubo de saída do coletor	$d_o$	19 mm
Comprimento do tubo de saída do coletor	$L_o$	0,3 m
Número de joelhos (ou equivalente) na saída do coletor	$NB_2$	2,63
Coefficiente de transferência de calor do tubo de saída e isolamento	$U_o$	1,5 kJ/(m <sup>2</sup> hK)
Volume do reservatório térmico	$V_{RT}$	90,5 litros
Altura do reservatório térmico	$H_{RT}$	0,39 m
Distância vertical entre a parte inferior do reservatório térmico e o retorno do coletor	$H_R$	0,23 m
Calor específico do fluido de trabalho	$c_p$	4,1794 kJ/(kg °C)
Densidade do fluido de trabalho em condições padrão	$\rho$	992,22 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de condutividade térmica do fluido no reservatório	$k_W$	2,27 kJ/(mhK)
Coefficiente global de transferência de calor do reservatório térmico	$(UA)_{RT}$ <sup>16</sup>	8,06 kJ/(h °C)
Razão entre a espessura de isolamento entre a superfície superior e a inferior do reservatório térmico	$r_i$	1
Temperatura inicial da região de pré-aquecimento do reservatório térmico	$T_i$	Variável
Potência máxima do resistor de aquecimento auxiliar	$\dot{Q}_{AUX-MAX}$	Desativado

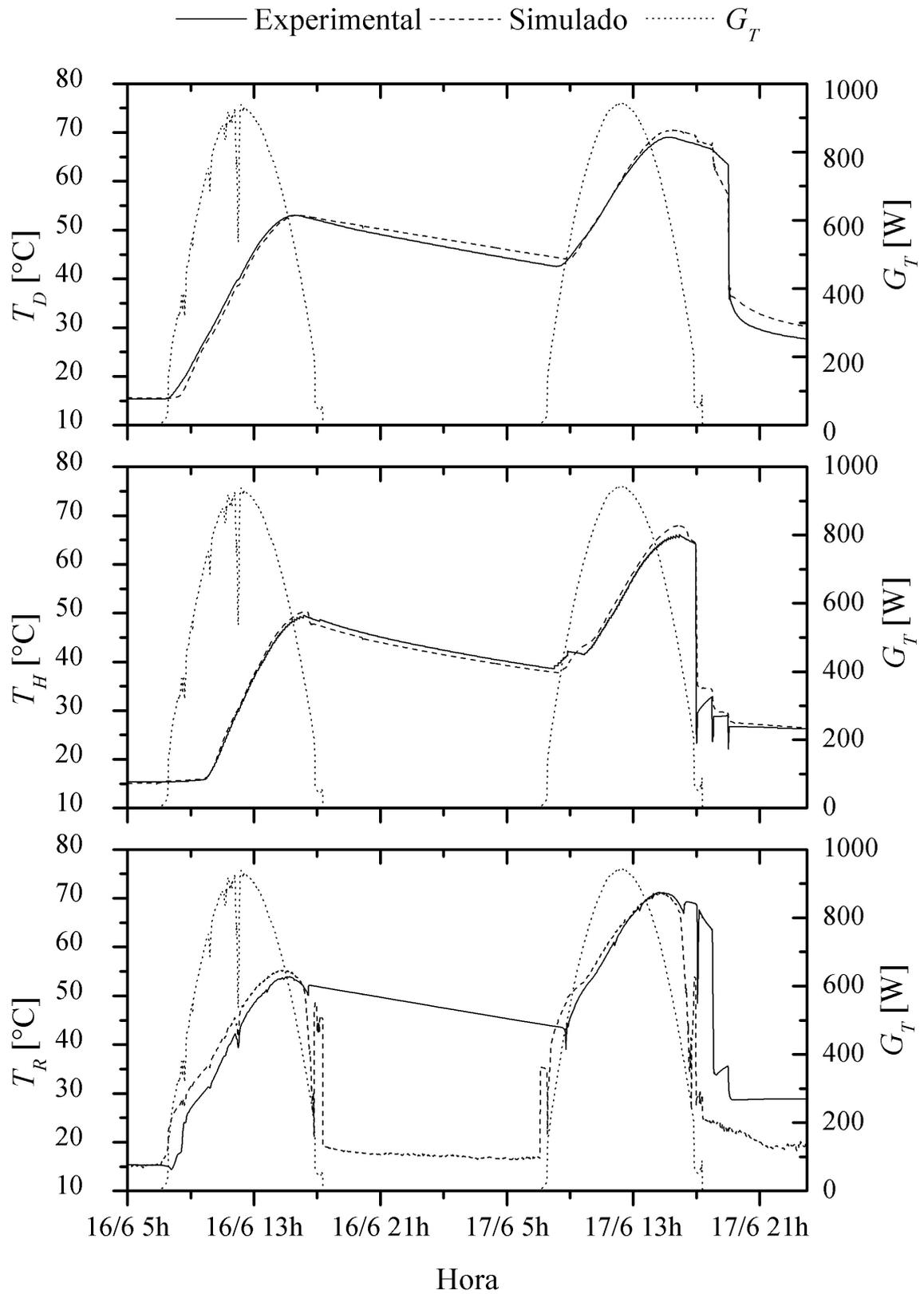
<sup>16</sup> Para uma descrição da metodologia de cálculo deste parâmetro, veja o ANEXO A.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Altura entre a superfície inferior do reservatório térmico e o resistor de aquecimento	$H_{AUX}$	0,195 m
Altura entre a superfície inferior do reservatório térmico e o termostato	$H_{Th}$	0,205 m
Histerese do termostato	$\Delta T_{db}$	Desativado

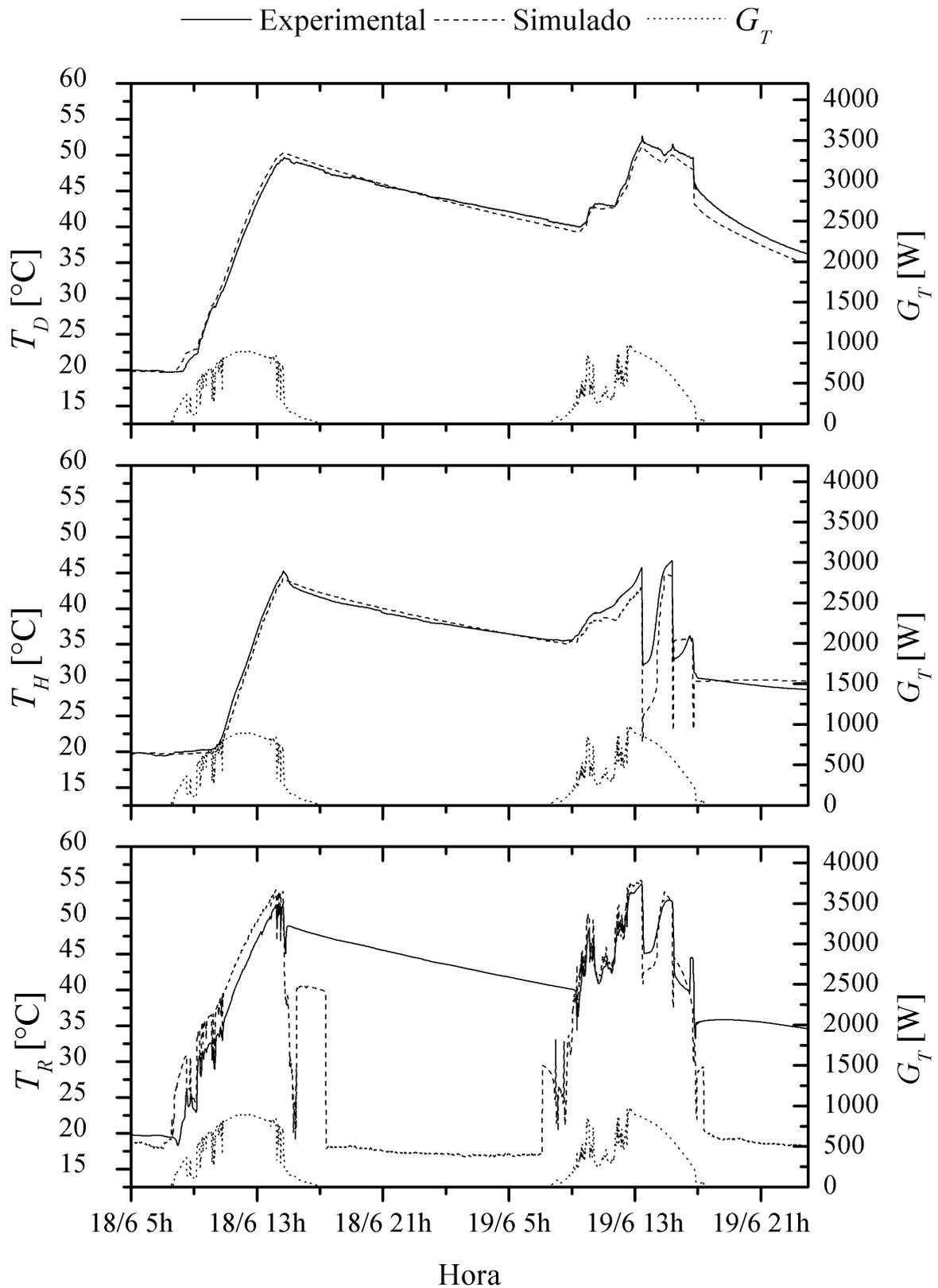
A unidade de aquisição usada é do fabricante Hewlett-Packard, modelo 34970A. As temperaturas foram registradas por meio de termopares do tipo T (cobre-constantan) com isolamento mineral do fabricante ENCIL. A calibração dos termopares foi feita por comparação com um termômetro de bulbo padrão com resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , em intervalos de  $5^{\circ}\text{C}$  ao longo da faixa de operação estimada ( $5^{\circ}\text{C}$  a  $90^{\circ}\text{C}$ ). Veja o Anexo C para dados estatísticos da curva de calibração de cada termopar.

### ***3.6 Resultados e Discussão***

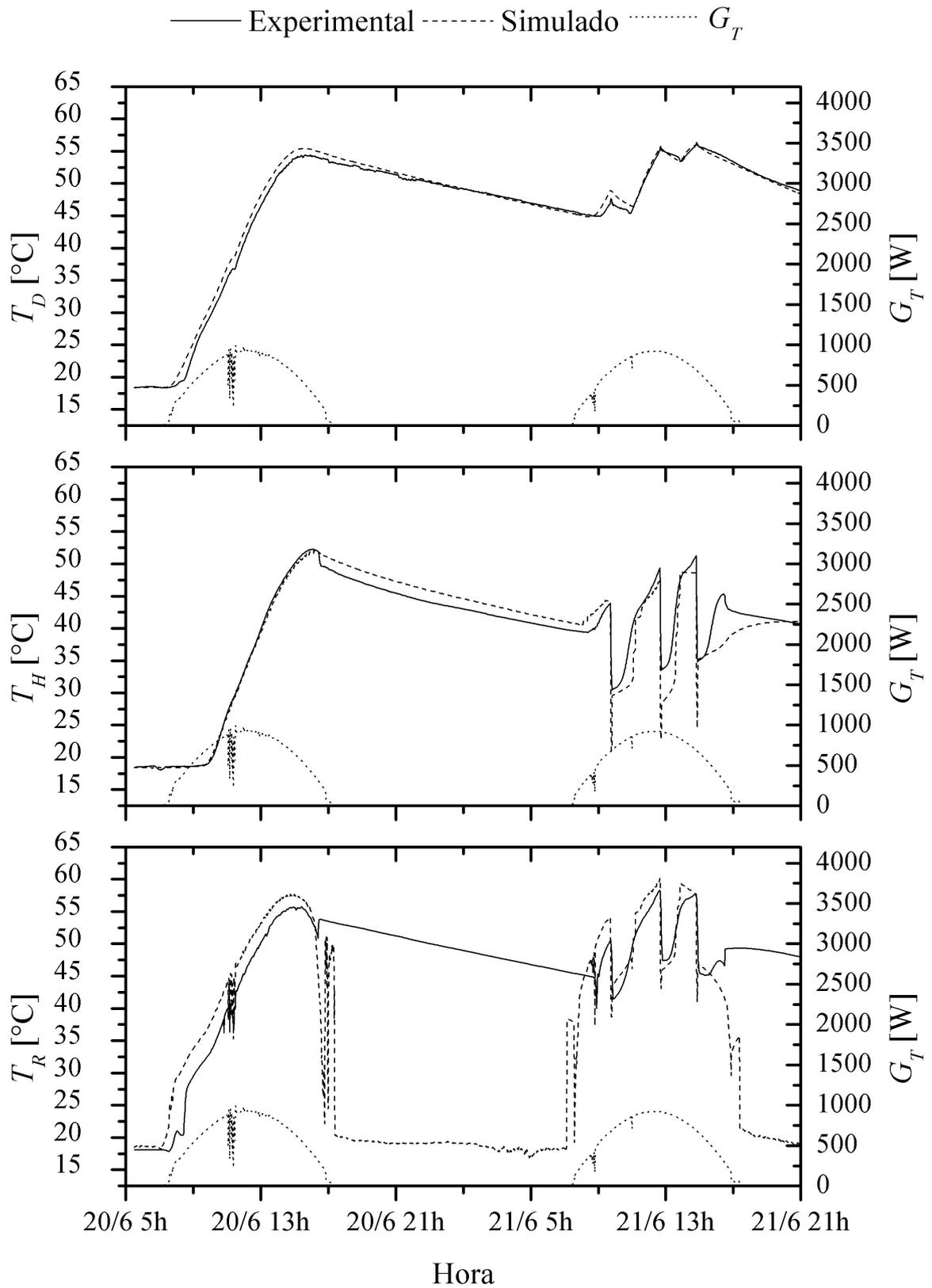
A validação do modelo foi dividida em três períodos. Em cada período deixou-se que o sistema acumulasse energia durante um dia, para então realizar a descarga de água quente no dia subsequente. As figuras 3.4, 3.5 e 3.6 mostram as curvas de temperaturas medidas e simuladas, assim como a irradiação global em plano inclinado para os três períodos.



**Fig. 3.4** Temperaturas e irradiação global em plano inclinado para o primeiro período de validação



**Fig. 3.5** Temperaturas e irradiação global em plano inclinado para o segundo período de validação

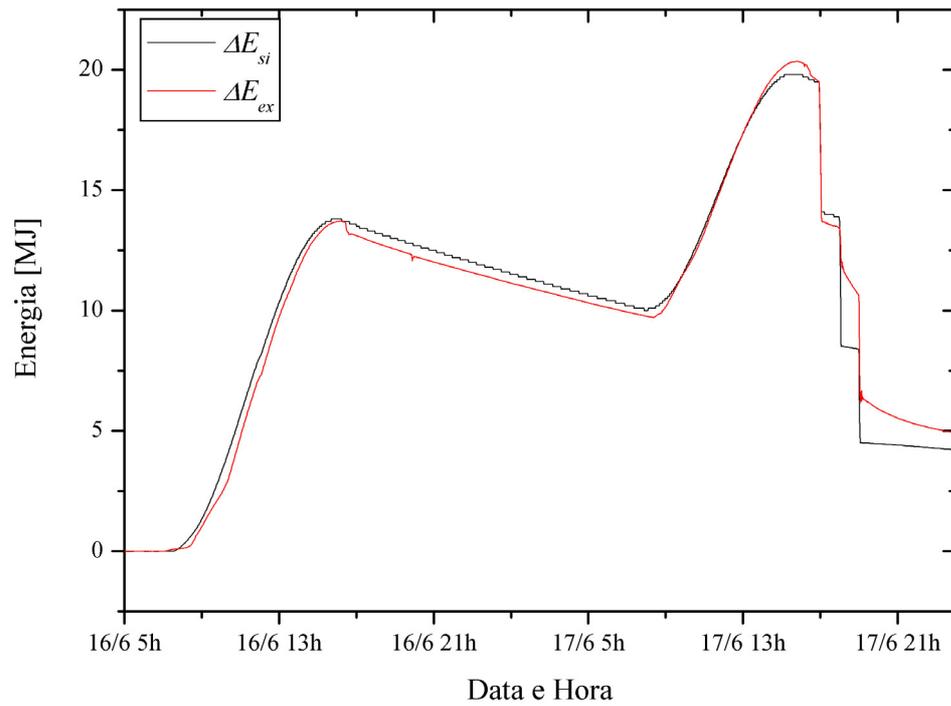


**Fig. 3.6** Temperaturas e irradiação global em plano inclinado para o terceiro período de validação

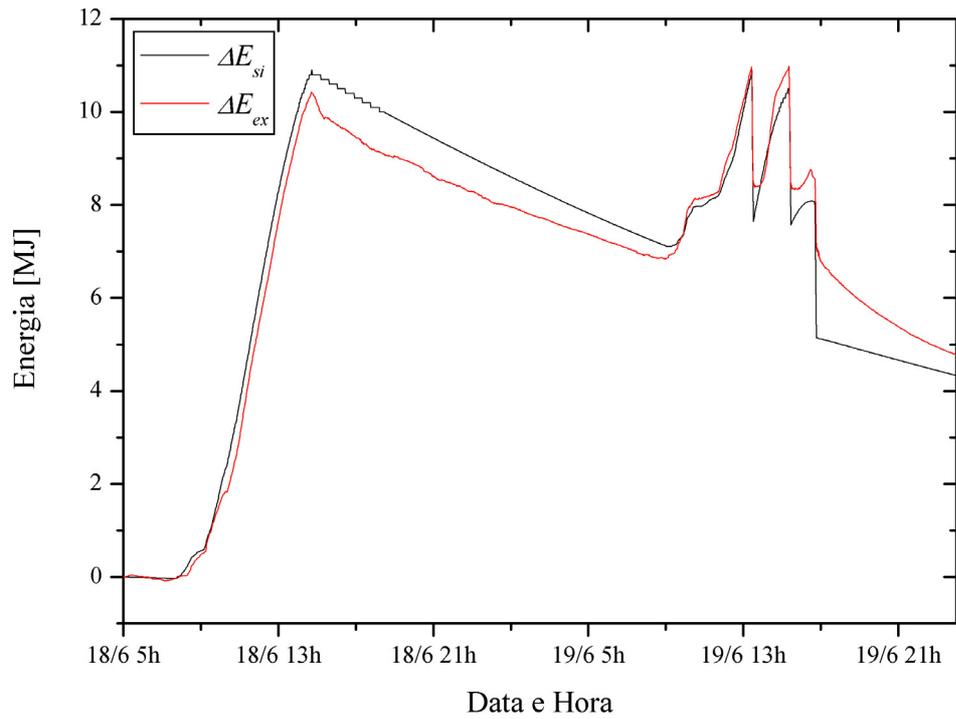
Em todas as figuras acima, as curvas simuladas acompanham o comportamento das curvas obtidas experimentalmente. É importante ressaltar que o código computacional do coletor solar do TRNSYS não leva em consideração efeitos capacitivos. É por essa razão que as curvas simuladas, no início e no fim do dia, apresentam variações mais acentuadas que as curvas experimentais. A curva para o valor simulado de  $T_R$  cai bruscamente durante a noite, afastando-se substancialmente da curva experimental. Isso ocorre em função da localização do termopar, o qual está situado na altura do tubo de retorno do coletor, porém dentro do reservatório térmico. A temperatura  $T_R$  simulada corresponde a uma posição na altura de entrada do tubo de retorno do coletor, porém fora do reservatório térmico. Uma outra observação interessante sobre a curva simulada de  $T_R$  é que no final do primeiro dia e início e final do segundo, para todos os períodos, há um comportamento oscilatório, sendo que a temperatura sobe e baixa repentinamente para então subir novamente. Isso ocorre porque a irradiação solar incidente não é suficiente para manter a circulação natural, fazendo com que o fluido que está prestes a entrar no reservatório se resfrie. As medidas experimentais não apresentam essa oscilação, mais uma vez, pelo fato do termopar estar localizado dentro do reservatório. Durante o período noturno, quando não há ganho de calor pelo sistema, as curvas experimentais e simuladas praticamente coincidem, indicando que o coeficiente global de transferência de calor obtido experimentalmente encontra-se muito próximo de seu valor verdadeiro. A curva  $T_H$  experimental apresenta um comportamento curioso na Fig. 3.6, após a última retirada de água quente no dia 21/6. Ao contrário da curva simulada, esta apresenta um pico, o qual também se manifesta na curva  $T_H$  experimental e não nas respectivas curvas simuladas. Possivelmente, esse fato pode ser atribuído a um efeito de mistura do fluido com a porção aquecida, já que a saída de água para o coletor do reservatório térmico e a saída para consumo estão localizadas do mesmo lado do reservatório térmico. Para a curva simulada  $T_H$  também ocorre um aumento de temperatura, mas nesse caso provavelmente devido a apenas efeitos condutivos. Enquanto ainda há ganho de calor útil no aparato experimental, o mesmo não ocorre na simulação.

A estratificação, mesmo sendo um reservatório térmico horizontal de dimensões reduzidas, é significativa e não pode ser desprezada, chegando a ser superior a 10°C durante boa parte do período de validação. Modelos de simulação que incorporam reservatórios *fully-mixed* (temperatura uniforme no reservatório) subestimam a quantidade de energia fornecida pelo sistema de aquecimento solar.

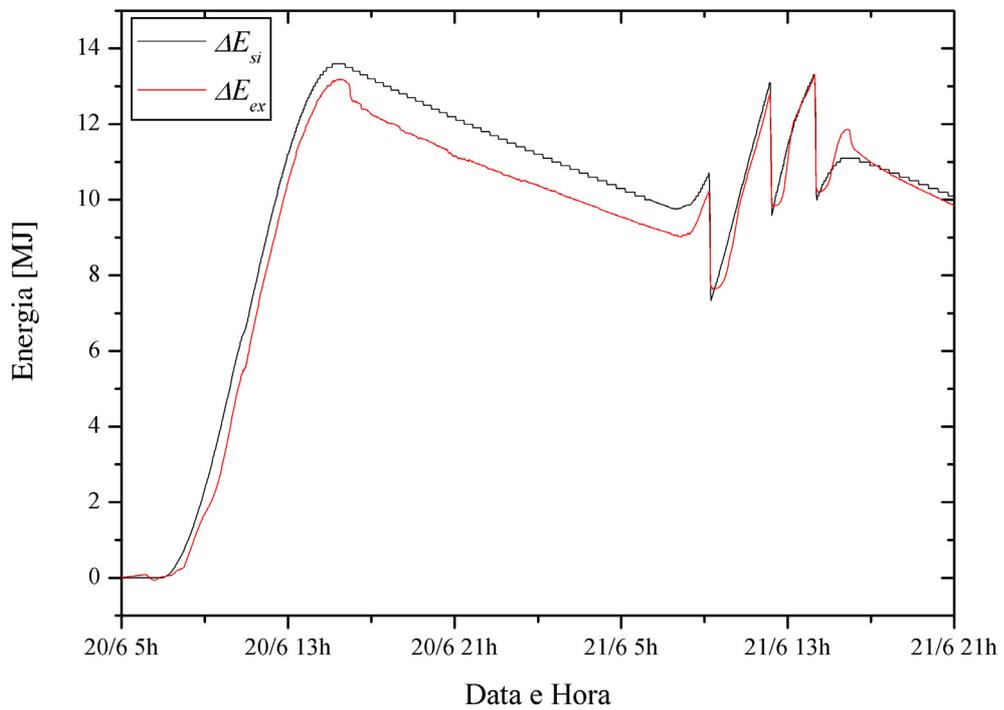
As figuras 3.7, 3.8 e 3.9 apresentam a variação de energia do reservatório térmico  $\Delta E$  para os períodos de validação. A obtenção da curva experimental foi feita usando uma temperatura média do reservatório, calculada como sendo a média aritmética entre as temperaturas  $T_H$  e  $T_D$ . Essa é uma aproximação, razão pela qual a variável  $\Delta E$  é analisada apenas qualitativamente. Estudos anteriores mostram que o perfil de temperaturas no reservatório térmico não é linear (Shin *et al.*, 2004; Oliveski *et al.*, 2003; Hegazy & Diab, 2002; Morrison & Braun, 1985).



**Fig. 3.7** Variação de energia do reservatório térmico para o primeiro período de validação



**Fig. 3.8** Variação de energia do reservatório térmico para o segundo período de validação



**Fig. 3.9** Variação de energia do reservatório térmico para o terceiro período de validação

O comportamento geral das curvas simuladas e das curvas experimentais mostradas nas figuras acima coincide, com maiores desvios ao fim dos dias simulados.

A Tab. 3.6 mostra as variáveis validadas com os respectivos valores das equações 3.56 e 3.57 para os três períodos de validação (algarismos romanos)

**Tab. 3.6 Parâmetros de validação para as variáveis analisadas e os três períodos de validação**

	I	II	II
$RMSE_{T_H}$	8,5 °C	3,5 °C	4,7 °C
$RMSE_{T_R}$	11,0 °C	9,3°C	8,3 °C
$RMSE_{T_D}$	7,9 °C	3,0 °C	2,3 °C
$R_{Q_D}$	+0,010	-0,005	+0,005

Para calcular o calor de  $RMSE_{T_R}$ , apenas as horas do dia (alvorada ao ocaso) foram consideradas, em função das razões anteriormente explicadas. As demais variáveis apresentam uma raiz do desvio quadrático médio dentro de limites aceitáveis. O erro na entrega de calor pelo sistema é praticamente inexistente.

O número de parâmetros necessários à implementação do código computacional é grande e nem todos eles são facilmente mensurados. A curva de eficiência do coletor foi obtida em uma bancada de teste para um outro coletor muito semelhante ao empregado neste trabalho, porém não idêntico. O coeficiente de transferência de calor da tubulação de entrada e saída do coletor foi estimado, sendo formado por trechos de diferentes materiais. Os valores de irradiação em plano horizontal foram medidos na estação radiométrica BSRN localizada no Bloco A do Departamento de Engenharia Mecânica, localizado a 40m da bancada experimental. Assim, erros advindos do cálculo de radiação solar em plano inclinado também influem nos resultados. A vazão fornecida para o programa como dado de entrada foi uma vazão média e não instantânea. Mesmo assim, o código computacional consegue prever o comportamento das variáveis analisadas com precisão satisfatória. A variável mais relevante para a análise do desempenho do sistema de aquecimento solar,  $Q_D$ , foi prevista com erro máximo de 1%.

## 4 **Análise dos Resultados da Medição *in situ***

A coleta de dados de medição foi realizada no período de fevereiro a junho de 2004. Neste capítulo, primeiramente a metodologia de coleta e tratamento de dados é explicada, para então proceder à apresentação e análise dos resultados obtidos.

### 4.1 **Metodologia**

A única grandeza física medida *in situ* foi a potência média dos chuveiros elétricos em intervalos de cinco minutos. Em cada apartamento um medidor de energia digital foi instalado e colocado em série com o chuveiro elétrico. Todos os chuveiros elétricos são da mesma marca e modelo e possuem um ajuste contínuo de potência. O conjunto total de 90 apartamentos foi dividido em um grupo de 60 apartamentos com o sistema de aquecimento solar com reservatório térmico integrado, denominado de “Grupo A” e 30 apartamentos sem o sistema de aquecimento solar, denominado de “Grupo B”. O Grupo B serve como grupo de comparação.

A escolha dos consumidores participantes do presente estudo deu-se mediante a aplicação de um questionário para a identificação de características de consumo de água quente. O Anexo B apresenta uma descrição detalhada da metodologia adotada durante essa fase do trabalho.

A coleta de dados exige a conexão de uma leitora ao medidor por acoplamento ótico. Em função do fato do medidor situar-se dentro da residência, a presença de um morador é indispensável ao processo de coleta de dados. A coleta de dados foi realizada durante a primeira semana de cada mês, no período das 20h às 22h. Por conseguinte, em nenhum dos meses analisados foi possível obter leituras de todos os medidores. Adicionalmente, dados coletados de apartamentos desocupados ou resultantes do uso incorreto dos sistemas de aquecimento solar foram descartados da análise.

A Tab. 4.1 apresenta o número de leituras usadas para cada grupo e mês nos resultados apresentados neste capítulo.

**Tab. 4.1 Número de consumidores usados para obtenção de resultados de fevereiro a maio de 2004**

Mês	Grupo A	Grupo B	Total
Fevereiro	45	23	68
Março	41	23	64
Abril	44	27	71
Mai	44	24	68

A análise dos resultados em intervalos de cinco minutos dificulta o processo de interpretação de resultados. Dessa forma, optou-se por totalizar a potência consumida em cada chuveiro elétrico em intervalos de uma hora e dividi-los em três subconjuntos de acordo com os dias da semana da seguinte maneira:

- (a) dias úteis
- (b) fins de semana e feriados
- (c) todos os dias

Essa divisão foi feita com o objetivo de verificar diferenças existentes entre os perfis de consumo de água quente entre os dias úteis e fins de semana e feriados.

Para cada mês, a comparação das seguintes grandezas entre os grupos A e B é feita.

- Consumo médio mensal por horário de energia dos chuveiros elétricos
- Porcentagem do consumo elétrico total da residência atribuída ao chuveiro elétrico
- Fator de carga do consumo médio mensal de energia dos chuveiros elétricos
- Potência instantânea no dia de demanda máxima do mês

A fração solar também é estimada para cada mês, mediante a comparação entre o consumo de energia no chuveiro elétrico de ambos os grupos. Assim,

$$f^* = \frac{Q_B - Q_A}{Q_B} \quad (4.1)$$

onde  $f^*$  é a fração solar estimada no mês,  $Q_A$  é o consumo médio mensal de energia pelos chuveiros elétricos do grupo A e  $Q_B$  é o consumo médio mensal de energia pelos chuveiros elétricos do grupo B.

Essa forma de estimar a fração solar é aproximada. Assume-se que os consumidores de ambos os grupos, em média, tenham um padrão de consumo de água quente semelhante. Isso tanto na distribuição horária quanto na quantidade de energia consumida.

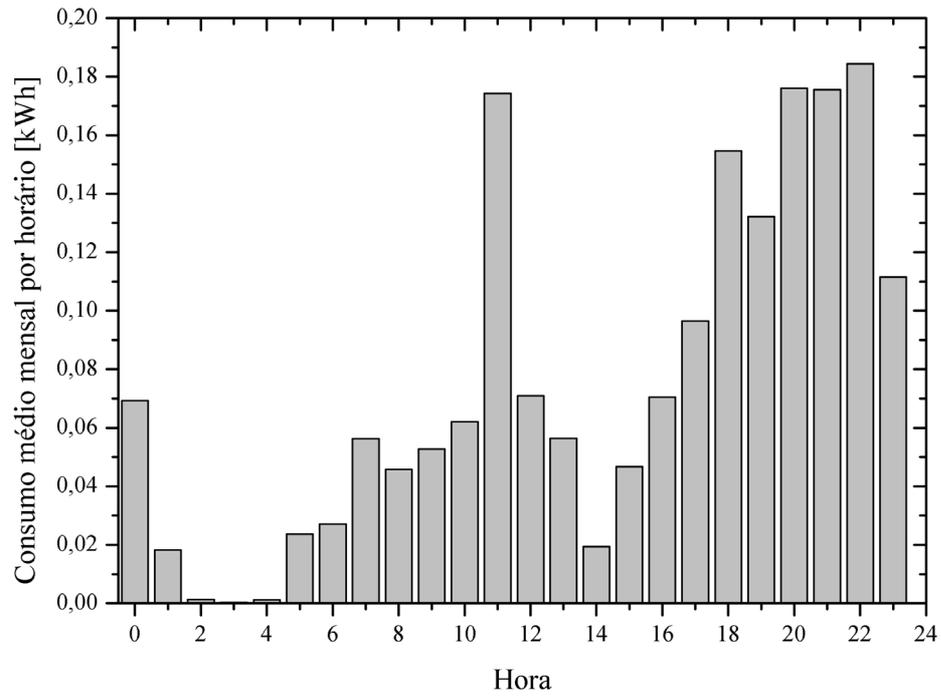
A partir da análise dos dados medidos dos consumidores do grupo B é possível identificar diferentes padrões de consumo de água quente. Uma classificação dos perfis em matutino, vespertino, noturno e madrugada foi feita com base no percentual do consumo total realizado em cada período, de acordo com a Tab. 4.2. O período em que ocorre o maior percentual do consumo total caracteriza o perfil.

**Tab. 4.2 Tipos de perfis de consumo de água quente e seus respectivos períodos característicos**

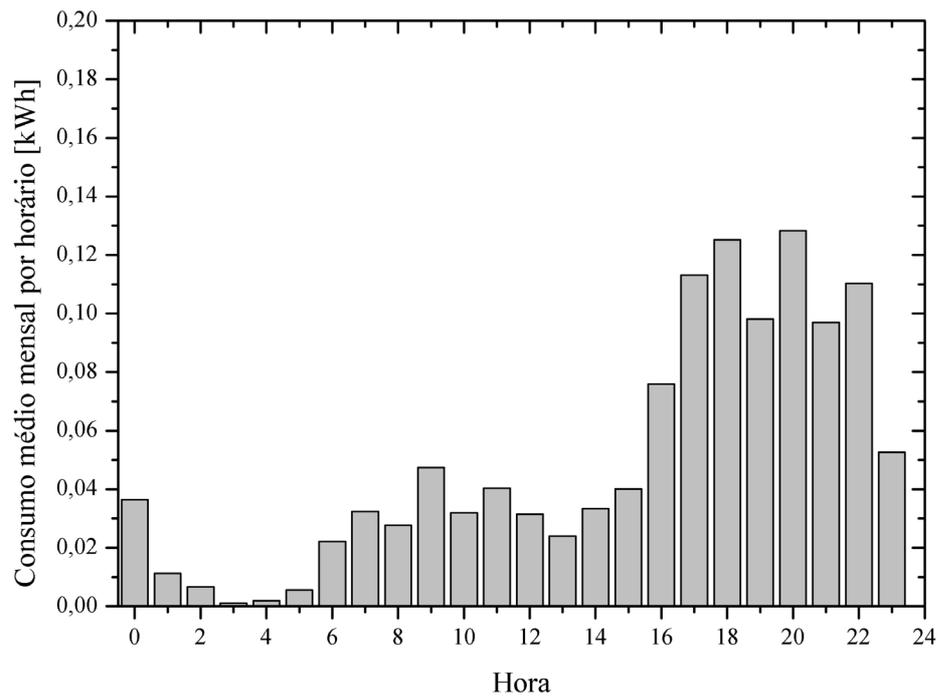
Tipo de Perfil	Horário característico de consumo
Matutino	6 às 12h
Vespertino	12 às 18h
Noturno	18 às 24h
Madrugada	0 às 6h

## ***4.2 Apresentação e discussão dos resultados obtidos***

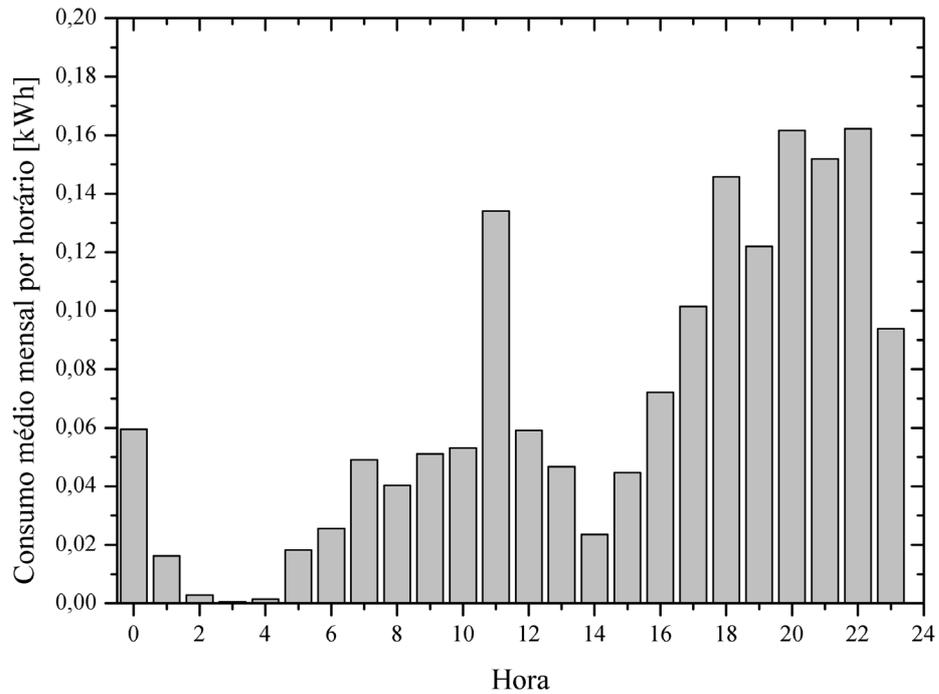
A classificação do consumo horário em dias úteis, fins de semana e feriados mostrou um deslocamento do consumo nos fins de semana e feriados para horários posteriores. Além disso, a quantidade de energia consumida diminuiu. Esses fatos podem ser visto nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3, que mostram o consumo médio mensal por horário para os dias úteis, fins de semana e feriados, e para todos os dias do mês de abril (dia padrão médio). Os demais meses apresentam características semelhantes e por isso não são mostrados.



**Fig. 4.1** Consumo médio mensal por horário dos dias úteis do mês de abril de 2004.



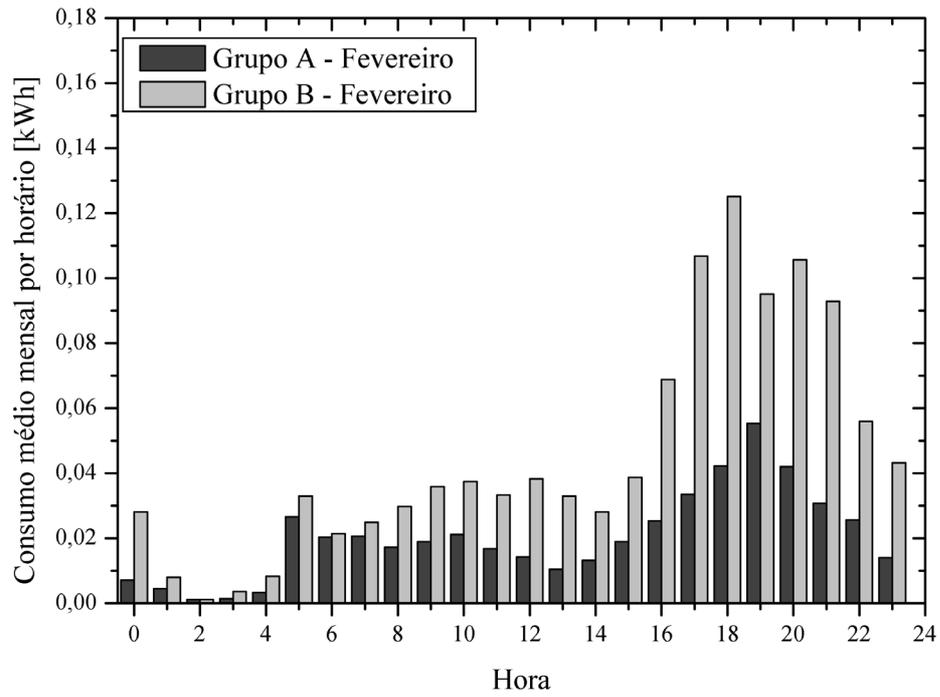
**Fig. 4.2** Consumo médio mensal por horário dos finais de semana e feriados do mês de abril de 2004.



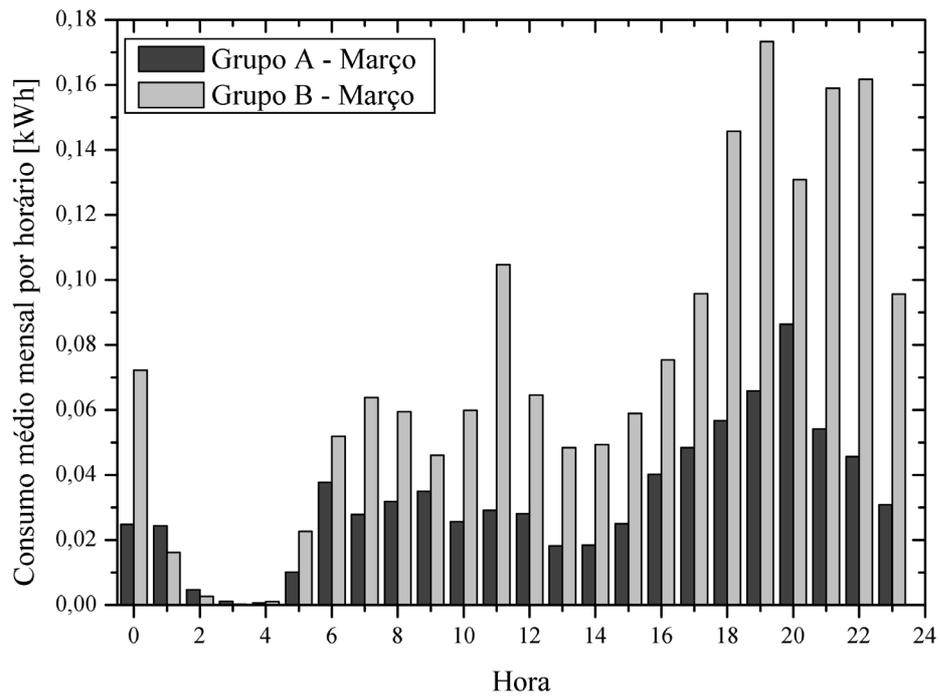
**Fig. 4.3 Consumo médio mensal por horário de todos os dias do mês de abril (dia padrão médio) de 2004.**

A influência dos fins de semana e feriados sobre o dia padrão médio não é significativa. Isso pode ser observado comparando a figura do dia útil médio com o dia padrão médio. Uma característica interessante é o desaparecimento do pico pronunciado próximo ao meio dia quando o dia útil médio é comparado ao dia de fim de semana e feriado médio. Uma possível explicação para a mudança de hábito é o fato de que, no fim de semana e feriado, aqueles que trabalham à tarde e tomam banho antes de sair de casa, deixam de fazê-lo.

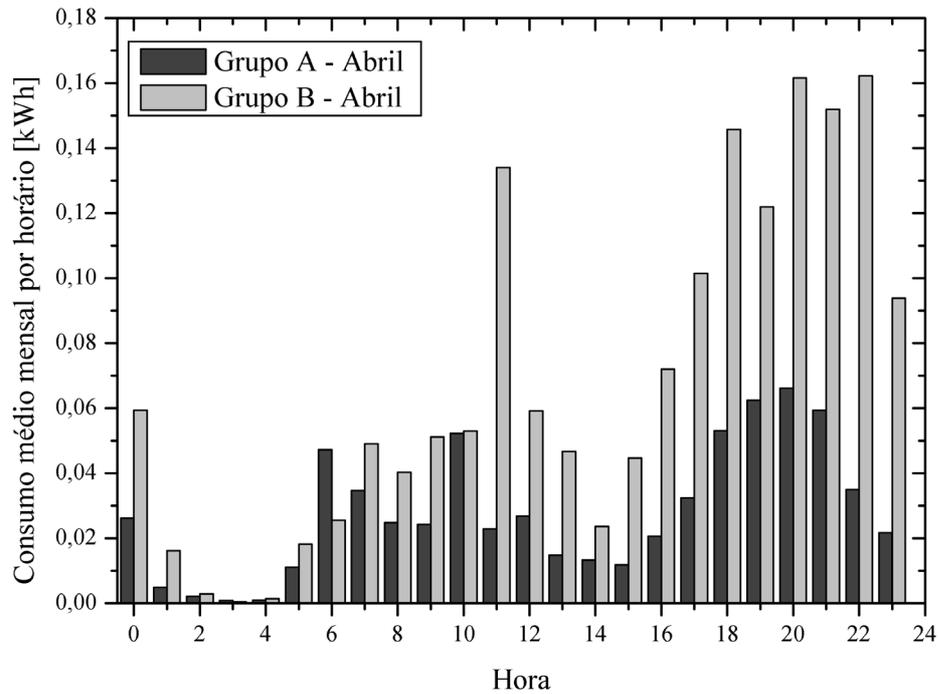
As figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 mostram, respectivamente, o consumo médio mensal por horário de energia dos chuveiros elétricos para os meses de fevereiro a maio de 2004.



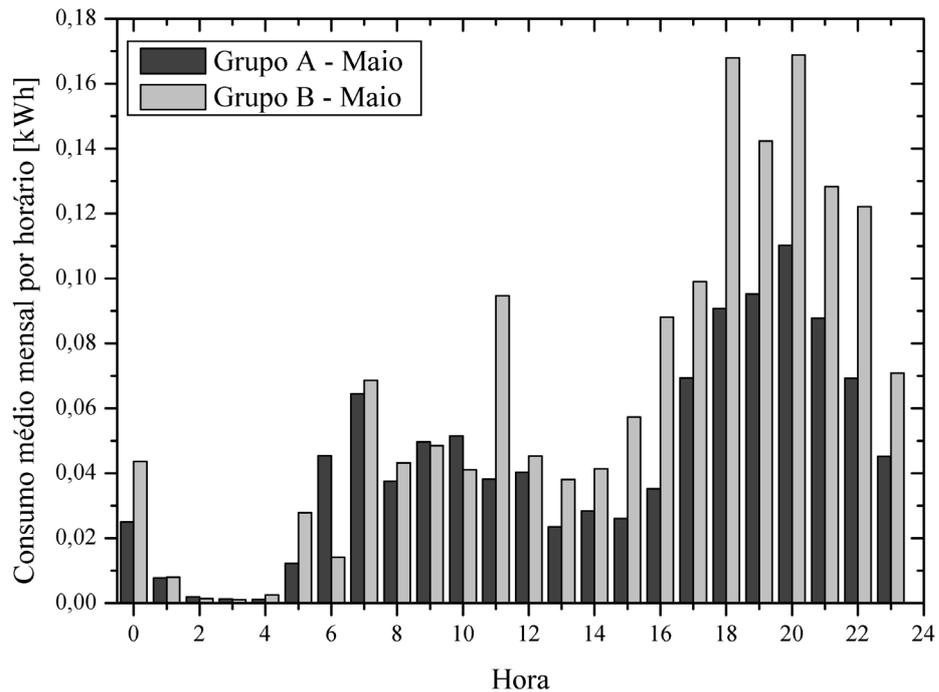
**Fig. 4.4 Consumo médio mensal por horário dos chuveiros elétricos em fevereiro de 2004**



**Fig. 4.5 Consumo médio mensal por horário dos chuveiros elétricos em março de 2004**



**Fig. 4.6 Consumo médio mensal por horário dos chuveiros elétricos em abril de 2004**



**Fig. 4.7 Consumo médio mensal por horário dos chuveiros elétricos em maio de 2004**

Em todos os meses ocorre um pico pronunciado próximo às 20h. Um pico menos acentuado também pode ser observado próximo ao meio dia. A presença do sistema de aquecimento solar reduz o consumo médio mensal por horário durante praticamente todas as horas do dia. As exceções provavelmente devem-se ao menor número de elementos no grupo

B, o que também influi na maior variabilidade do consumo ao longo do dia deste grupo quando comparada com o consumo do grupo A. Os meses de março a maio apresentam um patamar de consumo mais elevado do que aquele presente no mês de fevereiro. Isso se deve à maior irradiação global diária média mensal em plano horizontal desse mês. No mês de maio houve um período prolongado de céu encoberto, o que se refletiu no maior consumo do grupo B em relação aos meses anteriores. Na Fig. 4.7 é possível observar que praticamente não há diferença entre o consumo dos grupos A e B na parte da manhã e próximo ao meio dia. Isso ocorre porque nesse mês o sistema de aquecimento solar não foi capaz de fornecer água quente suficiente nesse período do dia. Já para o final de tarde e noite há uma redução do consumo de energia significativa.

A Tab. 4.3 mostra os fatores de carga para ambos os grupos em cada mês. É do interesse da concessionária de energia elétrica que os seus consumidores apresentem elevados fatores de carga, uma vez que assim todo o planejamento de geração de energia elétrica é facilitado. A presença de um pico no perfil de consumo de energia elétrica se traduz em maiores investimentos em geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

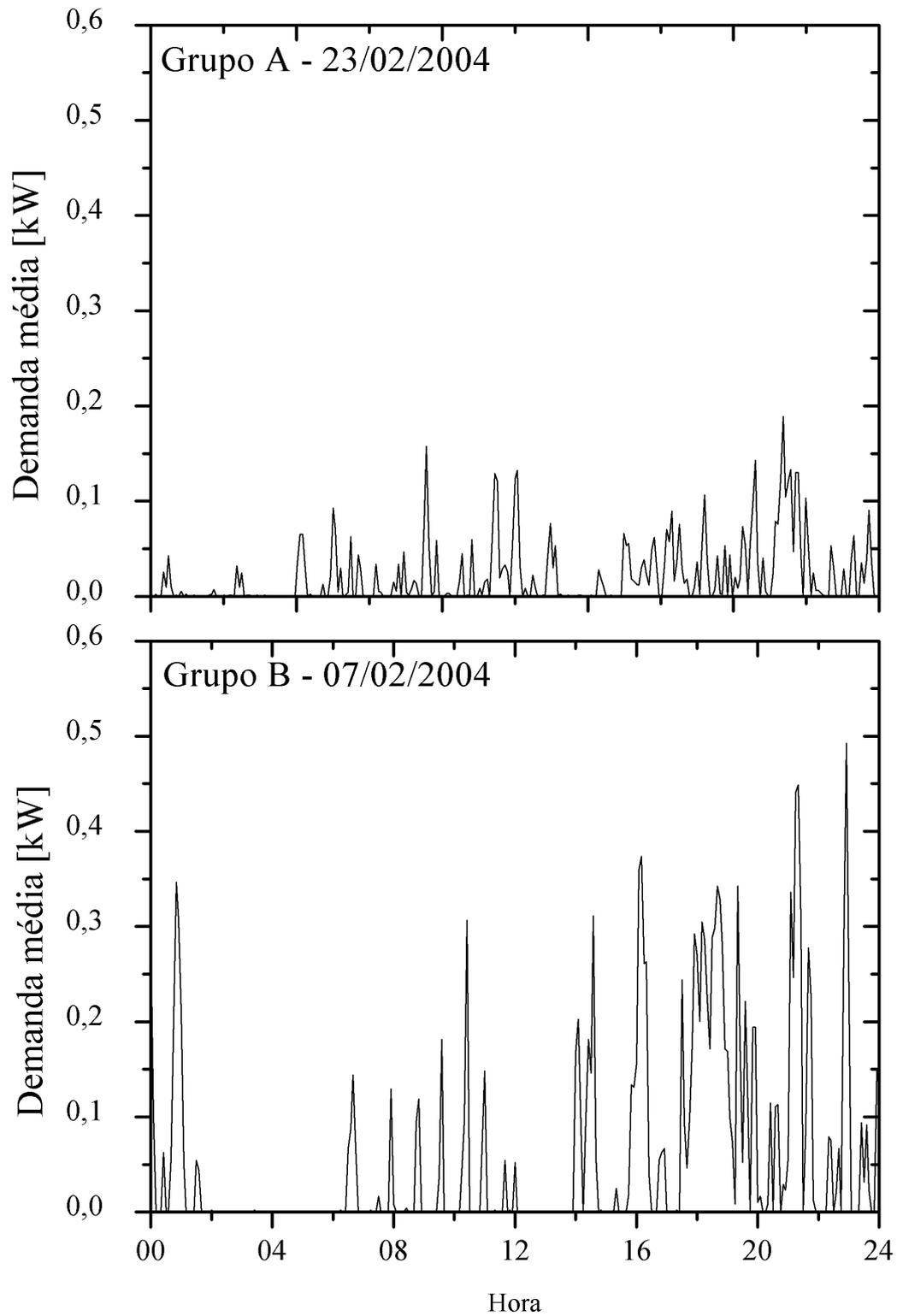
**Tab. 4.3 Fator carga do consumo médio mensal de energia dos chuveiros elétricos para os meses de fevereiro a maio de 2004**

Mês	Fator de Carga	
	Grupo A	Grupo B
Fevereiro	0,37	0,37
Março	0,37	0,42
Abril	0,42	0,42
Maio	0,40	0,39

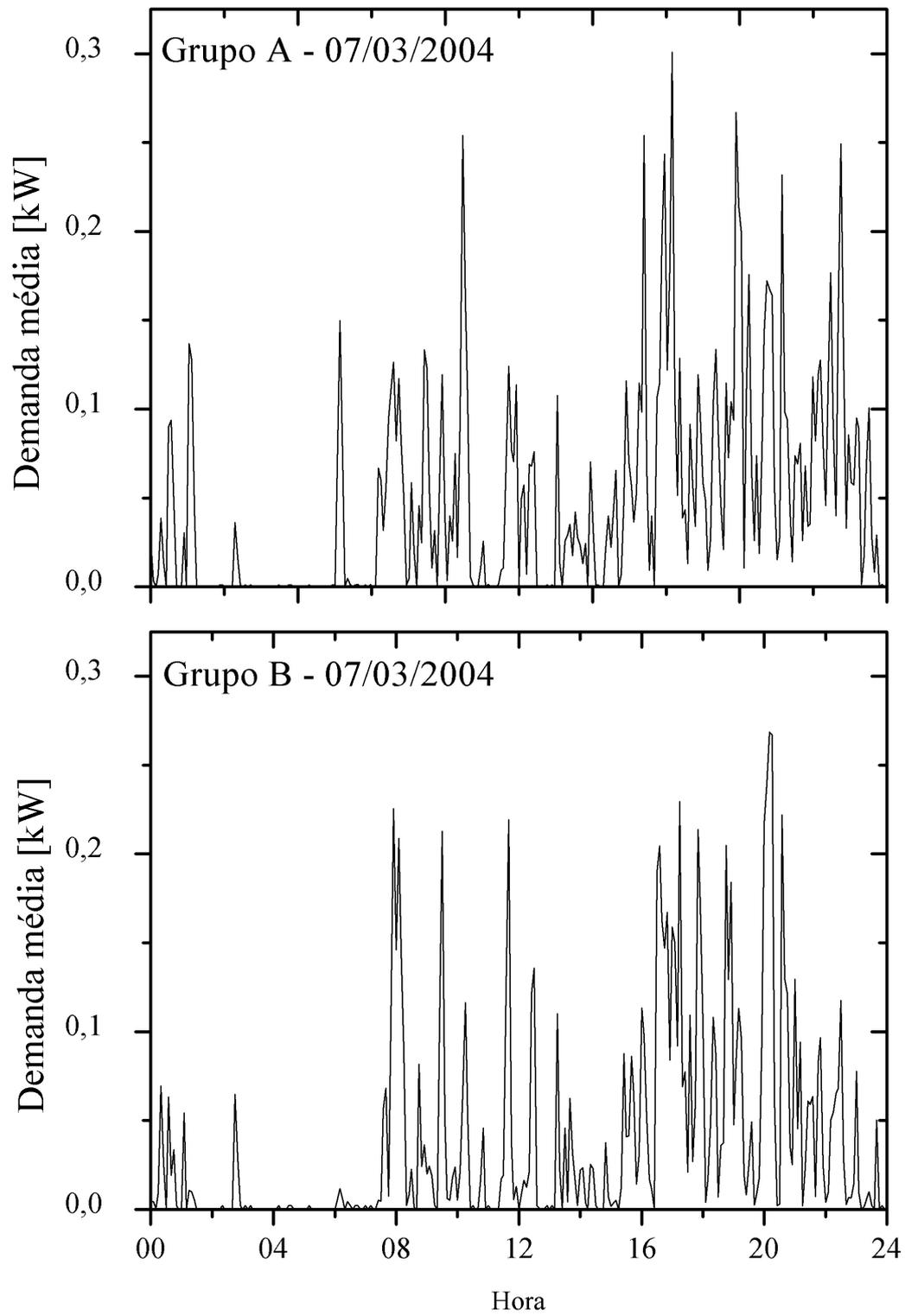
A presença do sistema de aquecimento solar não altera o fator de carga do consumo médio mensal de energia dos chuveiros elétricos de forma significativa, sendo que no mês de março o fator de carga do grupo A foi inclusive menor. A existência de um pico permanece, ainda que reduzido em seu valor absoluto.

O pico da demanda verdadeiro pode ser identificado pelo consumo instantâneo (potência). Na presente análise, a potência média é armazenada em intervalos de cinco minutos, o que fornece uma boa estimativa dos valores instantâneos. As figuras 4.8, 4.9, 4.10

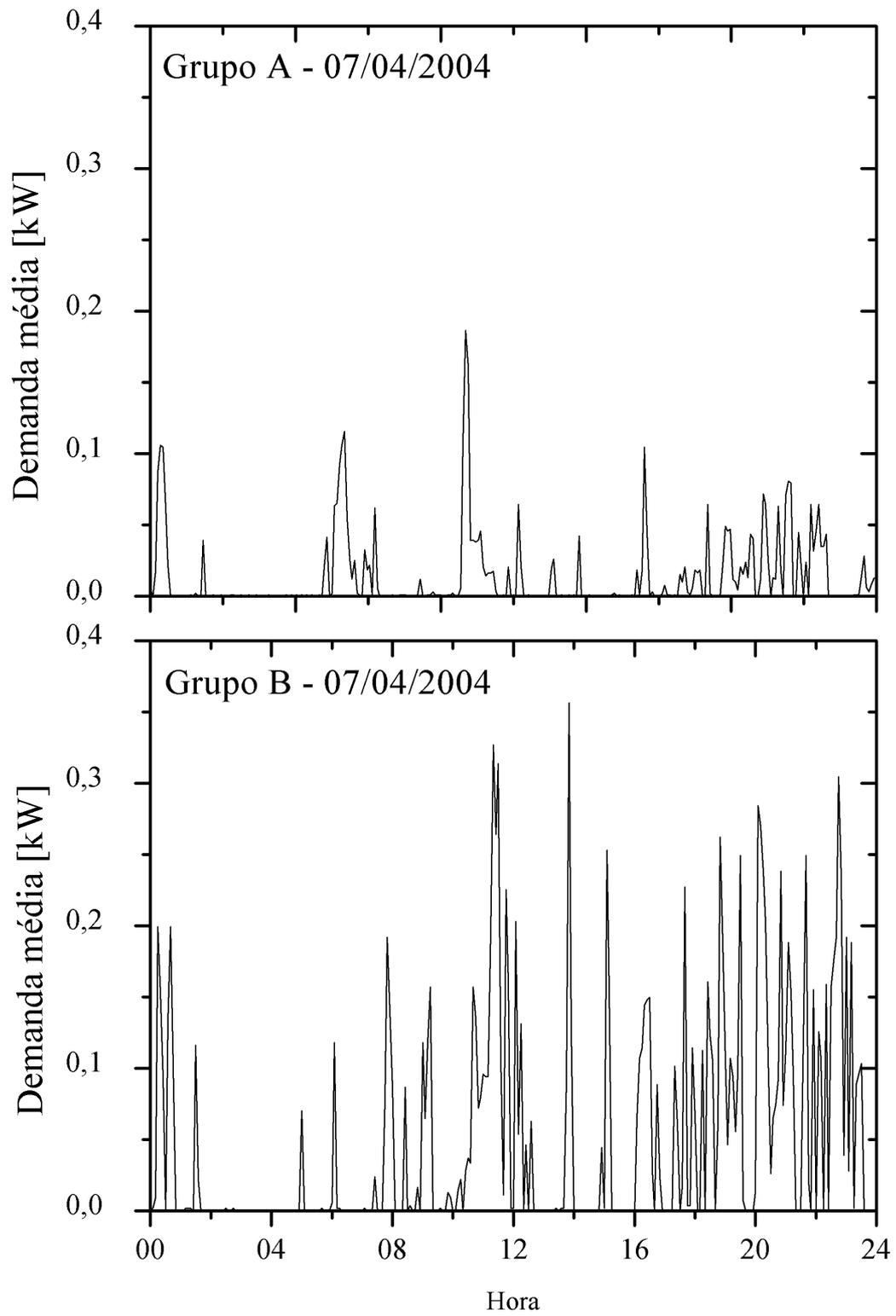
e 4.11 mostram a curva demanda média dos grupos A e B nos dias em que ocorreu o maior pico dos respectivos grupos, de fevereiro a maio de 2004.



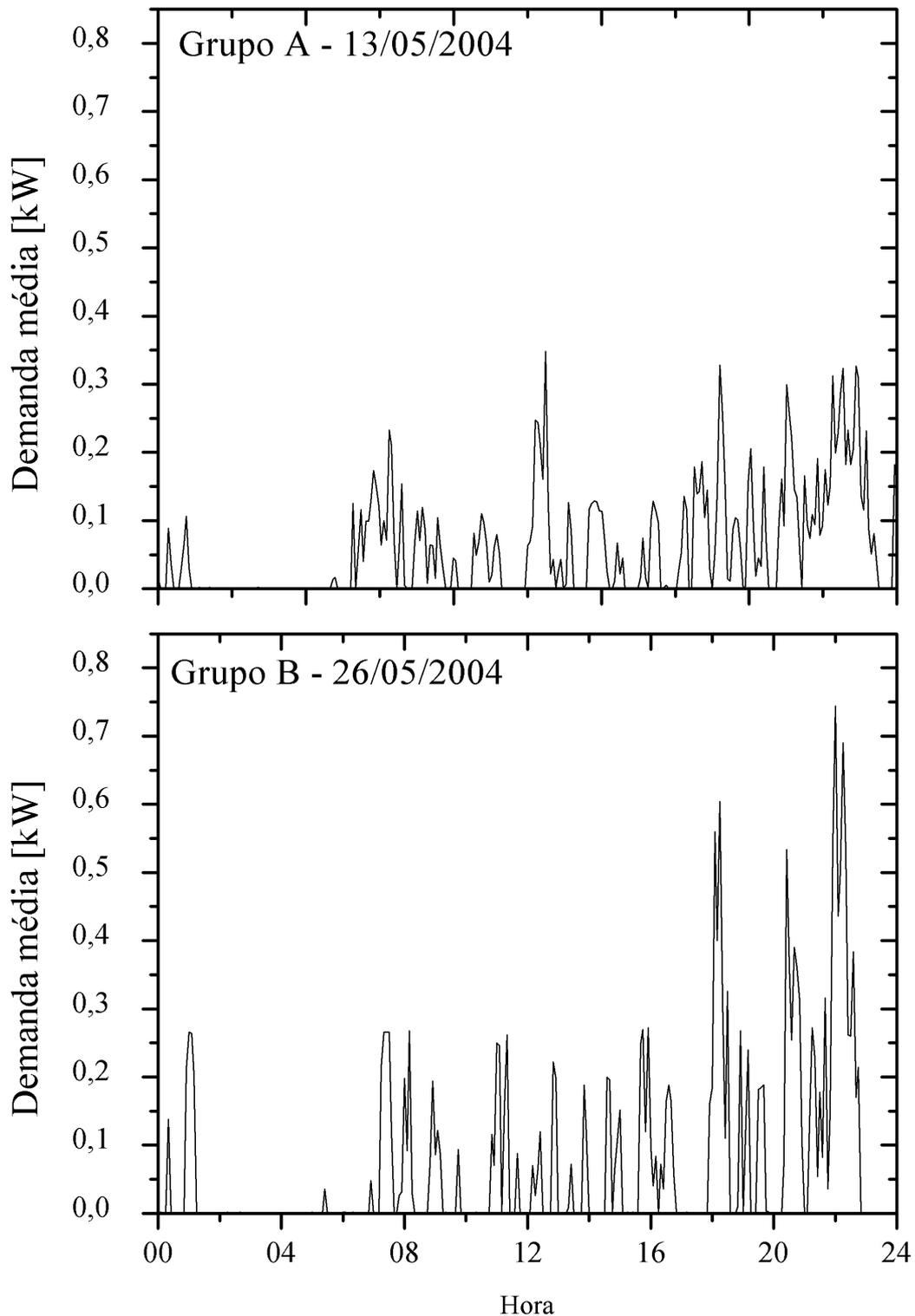
**Fig. 4.8 Demanda média no dia de pico máximo do mês de fevereiro de 2004**



**Fig. 4.9 Demanda média no dia de pico máximo do mês de março de 2004**



**Fig. 4.10** Demanda média no dia de pico máximo do mês de abril de 2004



**Fig. 4.11 Demanda média no dia de pico máximo do mês de maio de 2004**

Analisando as figuras acima, vê-se que a potência máxima do grupo A é inferior à do grupo B em todos os meses com a exceção do mês março. A contribuição máxima do chuveiro elétrico de cada consumidor do grupo A para o pico da curva de demanda desse mês foi de 0,30 kW, enquanto a contribuição máxima do grupo B foi de 0,27 kW. Nos meses de fevereiro, abril e maio houve uma redução do pico da curva de demanda em 62% (0,19 kW

para o grupo A e 0,49 kW para o grupo B), 48% (0,19 kW para o grupo A e 0,36 kW para o grupo B) e 53% (0,35 kW para o grupo A e 0,74 kW para o grupo B) respectivamente. Os resultados acima mostram que, mesmo havendo uma redução substancial no pico da curva de demanda com o uso do sistema de aquecimento solar, a tecnologia não garante a redução da demanda. Situações ocorrem nas quais o sistema de aquecimento solar não é capaz de fornecer água quente, como em dias consecutivos de céu encoberto ou chuva.

A fração solar para o período considerado é mostrada na Tab. 4.4, onde também são informadas a temperatura média do mês e a média mensal da irradiação global diária em plano horizontal.

**Tab. 4.4 Fração solar estimada, temperatura média mensal e média mensal de irradiação global em plano horizontal para os meses de fevereiro a abril de 2004.**

Mês	$f^*$	$\bar{H}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$\bar{T}_a$
Fevereiro	0,56	5,99	24,3
Março <sup>17</sup>	0,56	4,83	23,0
Abril	0,59	3,68	23,5
Maio	0,32	2,76	17,8

A fração solar não variou significativamente nos meses de fevereiro a abril, apesar dos valores decrescentes de  $\bar{H}$  e  $\bar{T}_a$ . Esse comportamento aparentemente anormal pode ser justificado pela melhoria do aprendizado no uso do sistema de aquecimento solar pelas famílias com a passagem dos meses. Boa parte dos sistemas apresentava problemas que somente foram solucionados a partir de janeiro. Além disso, é notório que os sistemas de aquecimento solar fornecem um banho com maior conforto térmico, razão pela qual os moradores chegam a alterar os hábitos de consumo de água quente, prolongando ou tomando banhos adicionais. A forma aproximada de cálculo da fração solar também pode ser apontada como motivo de irregularidade dos resultados. No mês de maio a fração solar caiu 46% em relação ao mês anterior, sendo que a queda de  $\bar{H}$  foi de 25%. O mês de maio apresentou períodos prolongados de chuva e céu encoberto, razão apontada para a queda acentuada da fração solar.

<sup>17</sup> Os valores para este mês referem-se ao período de 13/03 a 31/03, pois nos primeiros doze dias problemas técnicos impediram a aquisição de dados.

A Tab. 4.5 resume o percentual do consumo de energia elétrica residencial dos grupos A e B atribuída ao chuveiro elétrico.

**Tab. 4.5 Percentual do consumo de energia elétrica residencial atribuído ao chuveiro elétrico para os grupos A e B de fevereiro a maio de 2004.**

Mês	Grupo A	Grupo B
Fevereiro	15%	21%
Março	13%	22%
Abril	14%	25%
Maio	26%	25%

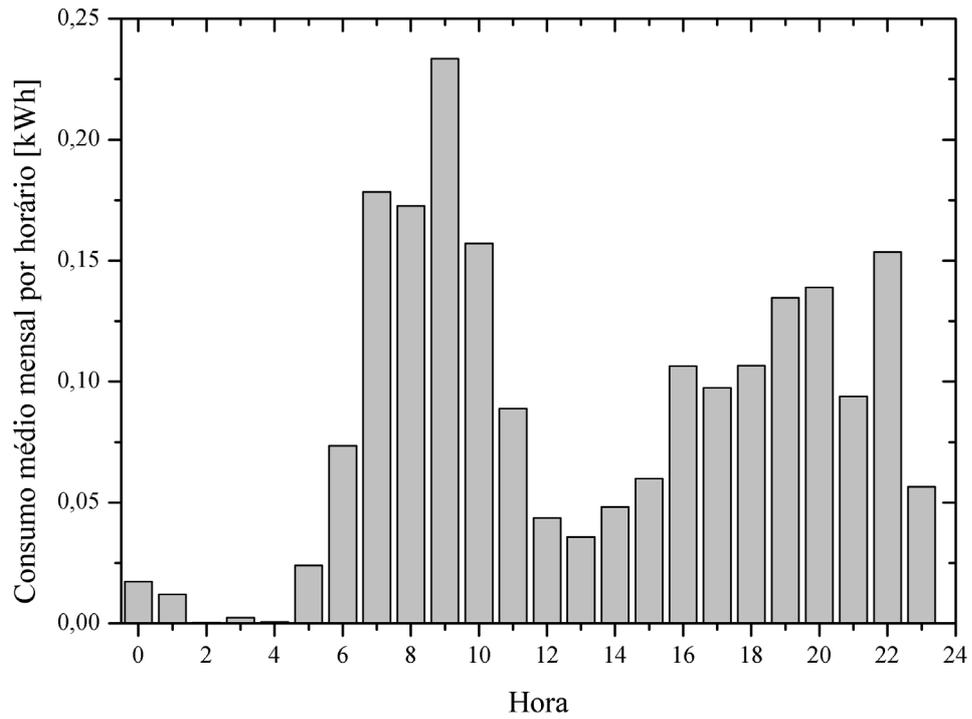
Em todos os meses, com exceção do mês de maio, o percentual do consumo de energia elétrica atribuído ao chuveiro elétrico foi menor para o grupo A. Partindo da hipótese que ambos os grupos apresentam, em média, perfis de consumo de água quente, eletrodomésticos e hábitos semelhantes, a tabela acima fornece um indicativo, assim, como a fração solar, da economia de energia que pode ser obtida com o uso do sistema de aquecimento solar.

O percentual dos perfis de consumo de água quente dos consumidores do grupo B a cada mês é mostrada na Tab. 4.6.

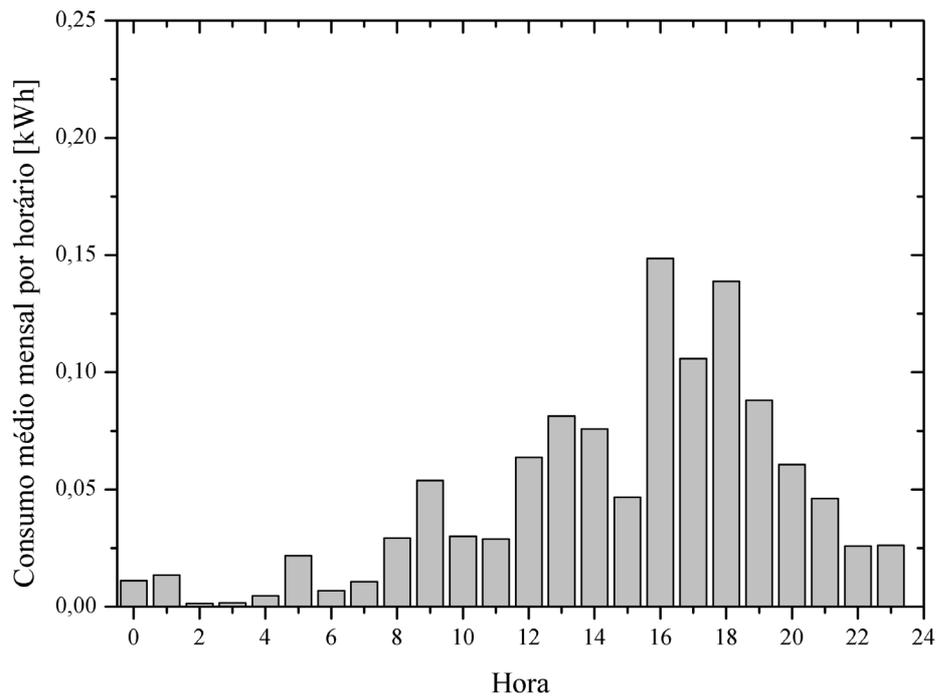
**Tab. 4.6 Percentual dos perfis de consumo de água quente do grupo B de 02/2004 a 05/2004.**

Perfil	Fevereiro 2004	Março 2004	Abril 2004	Maio 2004	Média
Matutino	4,3%	13,0%	7,4%	12,5%	9,3%
Vespertino	30,4%	4,3%	14,8%	16,7%	16,6%
Noturno	65,2%	78,3%	77,8%	70,8%	73,0%
Madrugada	0,0%	4,3%	0,0%	0,0%	1,1%

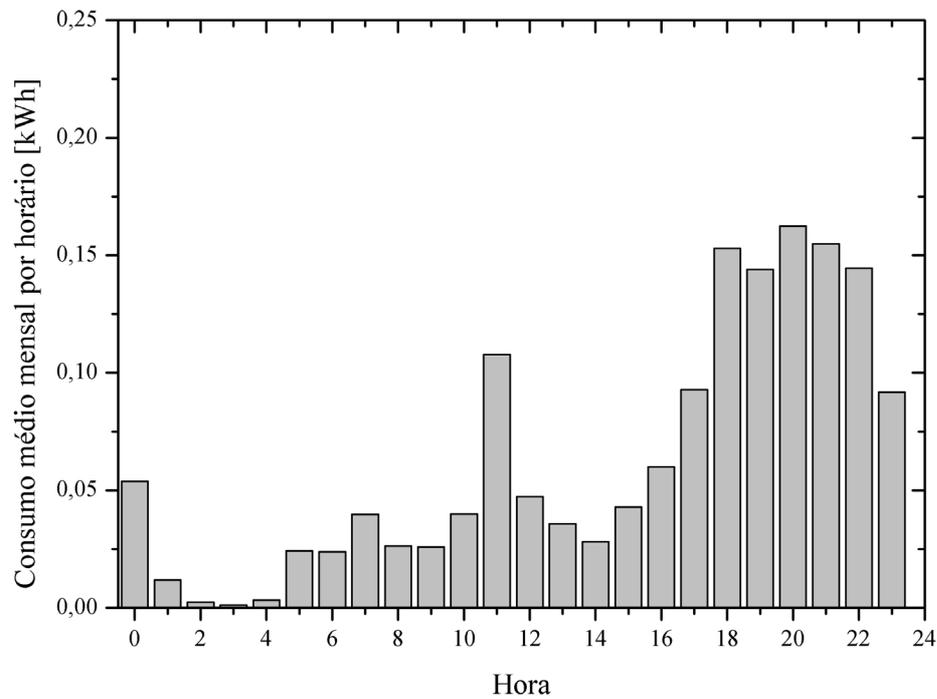
Em todos os meses há predominância do perfil noturno, seguido do perfil vespertino (com exceção do mês de março), do perfil matutino e do perfil madrugada. Essa característica de consumo de água quente realça a simultaneidade do consumo de água quente com o horário de pico da concessionária de energia elétrica (17:30 às 20:30 ou 18:00 às 21:00). Em função da baixa participação do perfil madrugada, o mesmo deixou de ser apresentado aqui. O consumo médio mensal por horário de cada perfil é mostrado nas figuras 4.12, 4.13 e 4.14.



**Fig. 4.12 Consumo médio mensal por horário do perfil matutino**



**Fig. 4.13 Consumo médio mensal por horário do perfil vespertino**



**Fig. 4.14 Consumo médio mensal por horário do perfil noturno**

As figuras acima mostram que mesmo o perfil matutino possui uma forte componente noturna. O perfil vespertino também está deslocado para o fim da tarde. O perfil matutino apresenta valores absolutos de consumo superiores aos demais perfis. Este comportamento pode ser explicado pelo período restrito de coleta de dados (4 meses) e também pela pobreza da classe amostral (ver Tab 4.1). Não obstante, as tendências de consumo são claras.

A título de comparação, o percentual dos perfis de consumo de água quente dos consumidores do grupo A a cada mês é mostrada na Tab. 4.7.

**Tab. 4.7 Percentual dos perfis de consumo de água quente do grupo A de 02/2004 a 05/2004.**

Perfil	Fevereiro 2004	Março 2004	Abril 2004	Mai 2004	Média
Matutino	29,5%	46,3%	43,2%	25,5%	36,2%
Vespertino	15,9%	12,2%	2,3%	10,6%	10,3%
Noturno	47,7%	36,6%	50,0%	61,7%	49,0%
Madrugada	6,8%	4,9%	4,5%	2,1%	4,1%

Há uma diferença importante nos valores mostrados acima com relação àqueles apresentados na Tab. 4.6. Com o uso do sistema de aquecimento solar, uma fração importante

do consumo de energia elétrica desloca-se para a manhã. Esse é o período em que o sistema de aquecimento solar tem a maior probabilidade de não ser capaz de fornecer água quente na temperatura desejada. Partindo do pressuposto que o comportamento de consumo de água quente dos grupos A e B é o mesmo, nos meses de baixa disponibilidade de irradiação solar, o percentual de consumo no período noturno aumenta, sobrepujando o consumo matutino. Já nos meses de alta disponibilidade de radiação solar, o consumo noturno é reduzido, perdendo importância frente ao consumo matutino. A análise simultânea dos dados apresentados nas tabelas 4.4, 4.6 e 4.7 corrobora as afirmações acima.

É importante ressaltar que os resultados apresentados nesse capítulo referem-se a um grupo de consumidores de baixa renda de um condomínio residencial localizado em Florianópolis. Não houve um tratamento estatístico rigoroso dos dados e a extensão a outras situações não deve ser feita. O período de análise também é restrito, sendo que as medições continuarão até completarem um ano.

## 5 Otimização Econômica de Parâmetros Construtivos

A otimização econômica dos parâmetros construtivos do sistema de aquecimento solar com reservatório térmico acoplado depende de objetivos conflitantes. Para a concessionária, o objetivo mais importante é a redução do consumo anual no horário de ponta, enquanto o consumidor deseja minimizar o custo anualizado do ciclo de vida (*ALCC*) do sistema. A solução resulta de um compromisso entre os interesses das partes envolvidas. O objetivo do presente capítulo é, através de um procedimento de otimização multivariável e programação multiobjetivo, encontrar a curva de compromisso ou curva de *tradeoff* entre o *ALCC* e o consumo anual de energia no horário de ponta. Inicialmente, uma breve revisão dos trabalhos de otimização com o TRNSYS é feita. O método de obtenção do *ALCC* é explicado, para então elucidar os conceitos relativos à curva de compromisso e a informação obtida a partir desta. Em seguida, faz-se uma explanação sobre a metodologia empregada para realizar o processo de otimização. Finalmente, os resultados do procedimento de otimização são apresentados e discutidos.

### 5.1 Trabalhos anteriores de otimização com TRNSYS

A otimização de parâmetros construtivos de sistemas de aquecimento solar usando dados de TMY (*Typical Meteorological Year*) e o software TRNSYS já foi realizada para um número restrito de parâmetros através de simulação exaustiva. Shariah & Löf (1996) derivam conclusões importantes com relação à razão entre o volume do tanque e a área de placa coletora para sistemas de aquecimento solar por circulação natural (termossifão). Em um estudo posterior Shariah & Löf (1997) investigaram os efeitos da localização do aquecimento auxiliar no desempenho anual do sistema de aquecimento solar por termossifão sob condições variáveis de operação. Uma de suas conclusões foi a de que o perfil de consumo de água quente, o volume da carga diária e a temperatura de consumo possuem grande influência sobre o desempenho do sistema de aquecimento solar. Michaelides & Wilson (1997) também estudaram os efeitos da posição do aquecimento auxiliar em sistemas de aquecimento solar por circulação natural. Colle *et al.* (2001) propuseram um método simplificado para otimizar a espessura do isolamento do reservatório térmico. Borges & Correia (1998) foram os primeiros a usar TRNSYS acoplado a uma rotina de otimização não-linear para a obtenção de parâmetros de projeto ótimos em problemas n-dimensionais, evitando, dessa maneira, a simulação exaustiva. Borges (2000) realizou um trabalho extenso de otimização multivariável

com o TRNSYS contemplando tarifa diferenciada, placas coletoras diferentes, com sete variáveis de decisão Recentemente, Salazar *et al.* (2003) acoplaram o programa TRNSYS ao otimizador genérico GenOpt para a otimização de um sistema de aquecimento solar compacto usando dois perfis de consumo de água quente hipotéticos. A mesma metodologia usada pelos autores é empregada no presente trabalho, porém, com perfis medidos. Kalogirou (2004) apresenta uma metodologia de otimização de um sistema de aquecimento industrial com coletores solares usando redes neurais para estabelecer a correlação entre a área de coletor e o volume de reservatório térmico a partir de um pequeno número de simulações com o TRNSYS. Subseqüentemente, um algoritmo genético é empregado para encontrar o valor dos parâmetros citados que maximizam o LCC do sistema.

## **5.2 *Custo do ciclo de vida anualizado (ALCC) aplicado ao PAR da CAIXA***

A análise de investimentos pelo custo do ciclo de vida, *LCC*, consiste em determinar o valor presente dos custos da opção de investimento analisada, no caso atual, o sistema de aquecimento solar. Uma vez obtido o *LCC*, o *ALCC* corresponde à uma série uniforme de pagamentos anuais, em valores monetários correntes, ao longo do ciclo de vida, cujo valor presente é igual ao *LCC*. O consumidor investigado neste trabalho é o de baixa renda, o qual dificilmente terá condições de arcar com os investimentos iniciais necessários à aquisição do sistema de aquecimento solar. Train (1985) alerta para o fato de que consumidores de baixa renda têm menos acesso a capital de mercado e menos capital líquido para investir que consumidores de renda mais elevada. Conseqüentemente, consumidores de baixa renda podem não estar dispostos a investir em medidas de conservação de energia, mesmo que o retorno do investimento seja suficiente para considerá-las viáveis. Em função desse fato e do interesse mostrado pela CAIXA em incluir sistemas de aquecimento solar em seus projetos de habitações populares, considera-se que a CAIXA integre o sistema de aquecimento solar ao patrimônio arrendado, acrescentando uma quantia adicional, proporcional ao valor do mesmo, à taxa de arrendamento mensal.

O *LCC* do sistema de aquecimento solar no presente trabalho, para o consumidor de baixa renda, é composto pelo valor presente das taxas pagas mensalmente e pelos custos operacionais e de manutenção do sistema de aquecimento solar. Os custos de manutenção, dentro da conjuntura admitida, são incluídos na taxa de condomínio, já que a manutenção é feita por uma empresa contratada pela administradora do condomínio.

Assim, os custos do ciclo de vida são dados pela Eq. 5.1 (Brandemuehl & Beckman, 1979)

$$LCC = P_1 CO + P_2 C_S \quad (5.1)$$

onde,

$$CO = \int_{\text{ano}} (\dot{Q}_{RT} + \dot{Q}_{CE}) \cdot C_{F1} \cdot dt \quad (5.2)$$

$$C_S = C_A A_C + C_{A-RT} A_{RT} + C_E + C_P \cdot \dot{Q}_{MAX-RT} + C_I V_I \quad (5.3)$$

$$P_1 = PWF(N_E, i_F, d) \quad (5.4)$$

$$P_2 = PWF(N_E, i_{TA}, d) r_{TA} + PWF(N_E, i_M, d) r_M \quad (5.5)$$

$$PWF(N, i, d) = \sum_{j=1}^N \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+d)^j} \quad (5.6)$$

Nas equações acima,  $CO$  é o custo operacional no primeiro ano (deve ser representativo do tipo climático estudado),  $C_S$  é o custo inicial do sistema,  $C_A$  é o custo unitário da área de coletor,  $C_{A-RT}$  é o custo unitário de área do reservatório térmico,  $A_{RT}$ ,  $C_E$  é composto pelos custos de instalação (mão-de-obra e custos fixos),  $C_P$  é o custo por unidade de potência do resistor de aquecimento auxiliar no reservatório térmico,  $\dot{Q}_{MAX-RT}$ ,  $C_I$  é o custo unitário de volume de isolamento,  $V_I$ ,  $P_1$  é o fator usado para determinar o valor presente dos custos operacionais durante a vida útil do sistema,  $P_2$  é o fator usado para fazer o mesmo com os custos de capital futuros,  $PWF$  é o fator de valor presente,  $N_E$  é o período da análise econômica,  $i_F$  é a inflação da energia elétrica,  $d$  é a taxa de desconto,  $i_{TA}$  é a inflação da taxa de arrendamento,  $i_M$  é a inflação da taxa de manutenção,  $r_{TA}$  é a razão entre taxa de arrendamento paga anualmente e o custo total do sistema e  $r_M$ , é a razão entre os custos de manutenção do primeiro ano e o custo inicial do sistema.

A inclusão do custo do resistor de aquecimento auxiliar, apesar de ser insignificante quando comparado aos demais, é recomendada para facilitar o processo de otimização. Caso o sistema de aquecimento solar possua um termostato, então qualquer variação no valor de

$\dot{Q}_{MAX-RT}$  não produzirá efeito algum no valor da função objetivo enquanto o termostato não estiver acionando o resistor de aquecimento auxiliar. Essa condição pode ser evitada associando um custo a  $\dot{Q}_{MAX-RT}$ , mesmo muito pequeno. O valor residual do sistema de aquecimento solar após o período da vida útil é considerado nulo.

O outro item de interesse a ser mensurado, o consumo anual no horário de ponta,  $E_{HP}$ , é dado pela Eq. 5.7,

$$E_{HP} = \int (\dot{Q}_{CE} + \dot{Q}_{RT}) \cdot \gamma \cdot dt \quad (5.7)$$

$$\gamma \begin{cases} = 1 \rightarrow t \in [18,21] \\ = 0 \rightarrow t \notin [18,21] \end{cases} \quad (5.8)$$

onde  $\gamma$  é uma variável de controle que determina o horário de ponta.

O custo anualizado do ciclo de vida,  $ALCC$ , é definido pela Eq. (5.9),

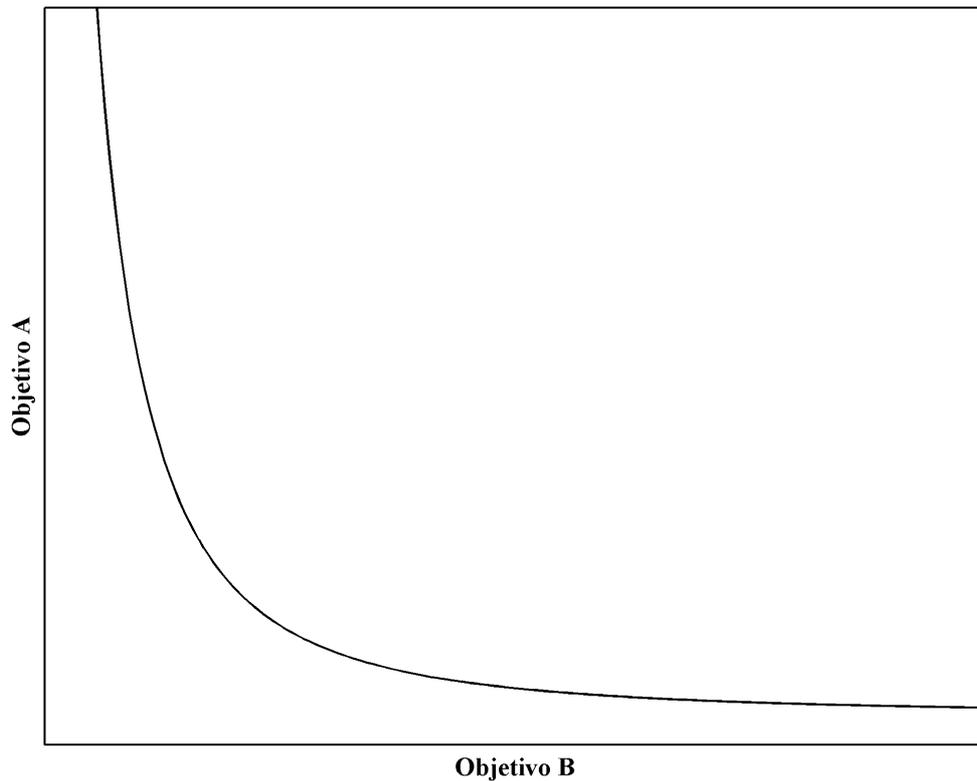
$$ALCC = \frac{LCC}{PWF(N_E, 0, d)} \quad (5.9)$$

A análise apresentada considera apenas os custos para o consumidor, chamada de *Life Cycle Cost Analysis (LCCA)*. O levantamento do impacto ambiental do uso da tecnologia de aquecimento solar ao longo do ciclo de vida do produto, como mudança climática, destruição da camada de ozônio, acidificação, estresse nocivo sobre a saúde humana e ecossistemas, esgotamento de recursos naturais, etc., denominado de *Life Cycle Assessment (LCA)* (Rebitzer *et al.*, 2004), não é realizado. Uma análise abrangente deve considerar não só o *LCCA* mas também o *LCA*.

### 5.3 A curva de compromisso ou curva de tradeoff

A curva de compromisso ou curva de *tradeoff* é usada para representar a relação entre dois objetivos conflitantes. No presente estudo, por um lado o consumidor quer reduzir o custo anualizado do ciclo de vida do sistema de aquecimento solar e pelo outro lado a

concessionária tem interesse em reduzir o consumo de energia elétrica durante o horário de ponta (Borges & Colle, 2004). O uso de curvas de compromisso é bastante comum em análises do impacto ambiental de diferentes opções tecnológicas (Muslu, 2004; Niimura & Nakashima, 2003; Zhijun & Kuby, 1997; Stam *et al.*, 1997). A Fig. 5.1 apresenta uma curva de compromisso genérica entre dois objetivos. A análise pode ser n-dimensional, sendo que no presente estudo uma análise bidimensional é apresentada.



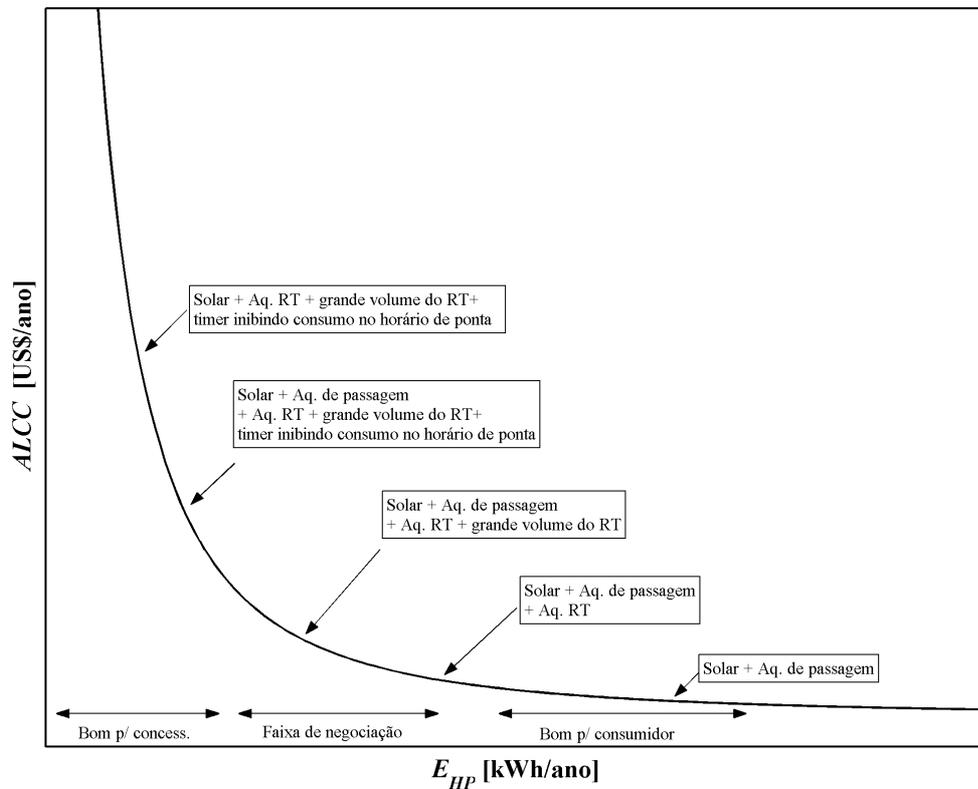
**Fig. 5.1 Curva de compromisso ou curva de *tradeoff* genérica**

A curva de compromisso é obtida a partir da otimização paramétrica. A função objetivo é definida pela parametrização dos objetivos conflitantes. Assim,

$$FO = \phi \cdot \text{Objetivo A} + (1 - \phi) \cdot \text{Objetivo B} \quad \text{onde } \phi \in [0,1] \quad (5.10)$$

Através do parâmetro  $\phi$ , transforma-se o problema multiobjetivo em um problema de um único objetivo, o que simplifica o processo de otimização (Muslu, 2004; Steuer, 1986). A cada valor atribuído a  $\phi$ , uma otimização multivariável é realizada, definindo um ponto da curva de compromisso. Diferentes pontos da curva representam concepções tecnológicas distintas, dependendo das variáveis otimizadas. A valorização de um objetivo frente a outro

na função objetivo sinaliza concepções tecnológicas diferentes. Um exemplo hipotético é mostrado na Fig. 5.2 para os objetivos parametrizados no presente trabalho.



**Fig. 5.2 Curva de compromisso hipotética do custo do ciclo de vida anualizado versus o consumo anual de energia no horário de ponta (Borges & Colle, 2004).**

Uma vez obtida a curva de compromisso, é função dos gestores de política energética, juntamente com as concessionárias de energia elétrica e os representantes da sociedade, negociar uma solução de compromisso, resultando na escolha de uma opção tecnológica correspondente.

O ponto da curva de compromisso adotado pode ser usado para definir uma sobretaxa a ser cobrada pela concessionária de energia elétrica pelo consumo de energia no horário de ponta,  $ST_{HP}$  (Borges & Colle, 2004). A representação do custo anual de consumo do consumidor devido à sobretaxa imposta,  $CST_C$  é dada pela Eq. (5.11)

$$CST_C = \frac{ST_{HP} \cdot E_{HP} \cdot P_1}{PWF(N_E, 0, d)} \quad (5.11)$$

O custo total da solução adotada para o consumidor é dado pela Eq. 5.12.

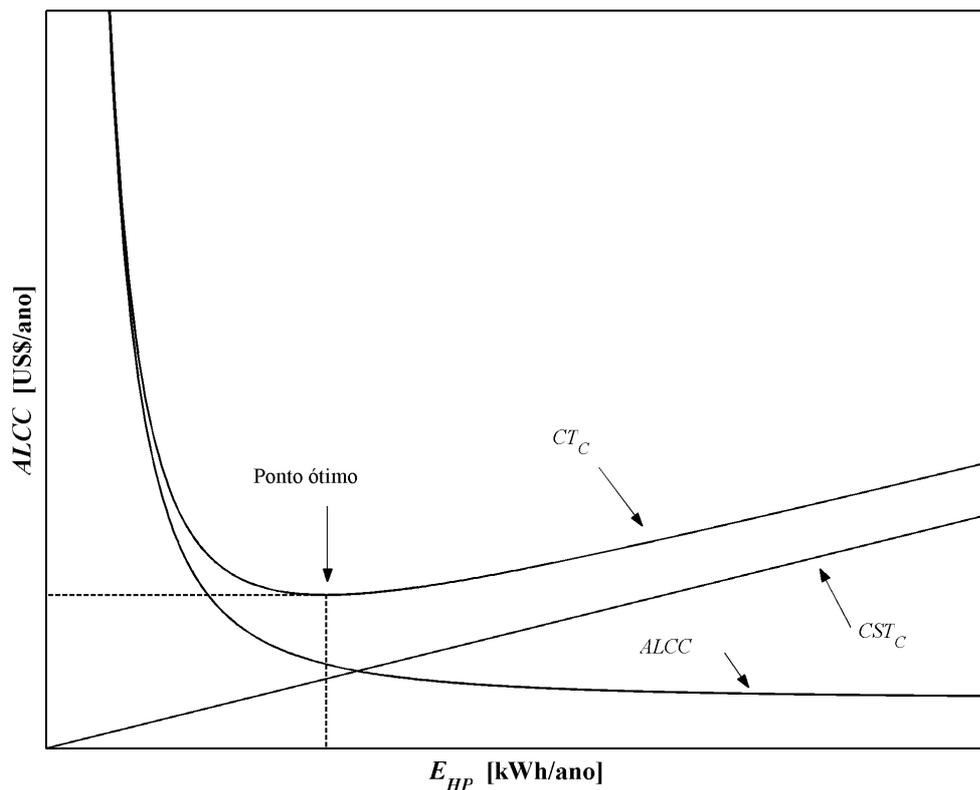
$$CT_C = ALCC + CST_C \quad (5.12)$$

O mínimo do  $CT_C$  é obtido derivando a Eq. 5.12 em relação ao consumo no horário de ponta e igualando o resultado a zero. Obtém-se,

$$ST_{HP} = - \left. \frac{\partial ALCC}{\partial E_{HP}} \right|_{\text{Ponto adotado}} \cdot \frac{PWF(N_e, 0, d)}{P_1} \quad (5.13)$$

Assim, a sobretaxa que fornece o valor ótimo para  $CT_C$  é obtido mediante o cálculo do simétrico da derivada da curva de compromisso no ponto de interesse (Borges & Colle, 2004).

A Fig. 5.3 mostra as curvas de  $ALCC$ ,  $CST_C$  e  $CT_C$  para um caso hipotético.



**Fig. 5.3** Exemplo hipotético das curvas  $ALCC$ ,  $CST_C$  e  $CT_C$

As vantagens da programação multiobjetivo sobre a simulação de cenários tarifários residem no fato de que a correlação entre concepções tecnológicas e seus impactos sobre o consumo não está em forma explícita para o caso dos cenários, o que dificulta a escolha dos

cenários a serem investigados. Além disso, a simulação de cenários pode ocultar possibilidades para os decisores, caso toda a faixa de negociação não seja explorada.

A otimização do sistema de aquecimento solar não deve deixar de atender as necessidades de consumo de água quente. Assim, impõe-se um custo,  $CO_{EF}$ , pela quantidade de energia que deixa de ser entregue,  $EF$ , “ $\kappa$ ” vezes superior ao preço cobrado normalmente. Esse artifício é empregado para evitar soluções econômicas, porém tecnicamente deficientes. A Eq. 5.14 é empregada para calcular  $EF$  e a Eq. 5.15 determina o custo associado a essa energia.

$$EF = \int_{ano} \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{SET} - T_D)^+ \cdot dt \quad (5.14)$$

$$CO_{EF} = \kappa \cdot C_{F1} \cdot EF \quad (5.15)$$

onde “+” significa que apenas valores positivos são considerados, sendo o valor entre parênteses igualado a zero nos outros casos. A função objetivo resulta da substituição dos termos  $CO$  e  $E_{HP}$  na Eq. 5.1 e na Eq. 5.7, a anualização da Eq. 5.1 através da Eq. 5.9, e a inserção dos termos resultantes na Eq. 5.10, além da adição do termo relativo à energia faltante (Eq. 5.14) multiplicada pelos fatores  $\phi$  e  $P_1$ . Obtém-se,

$$FO = \phi \cdot \underbrace{\left[ \frac{P_1 CO + P_2 C_S}{PWF(N_E, 0, d)} \right]}_{ALCC} + (1 - \phi) \cdot E_{HP} + \underbrace{\phi \cdot P_1 \cdot CO_{EF}}_{\text{Custo da EF}} + (1 - \phi) \cdot \kappa \cdot EF \quad (5.16)$$

onde  $ALCC + P_1 \cdot CO_{EF}$  e  $E_{HP} + EF$  constituem o Objetivo A e o Objetivo B da Eq. 5.10, respectivamente. Optou-se por apresentar os termos relativos à energia faltante separadamente, sendo que o mesmo é usado no processo de otimização, mas não é incluído na curva de compromisso. O problema de otimização é então definido como segue,

$$\min_{\vec{x} \in \bar{X}} FO(x) \quad (5.17)$$

onde,

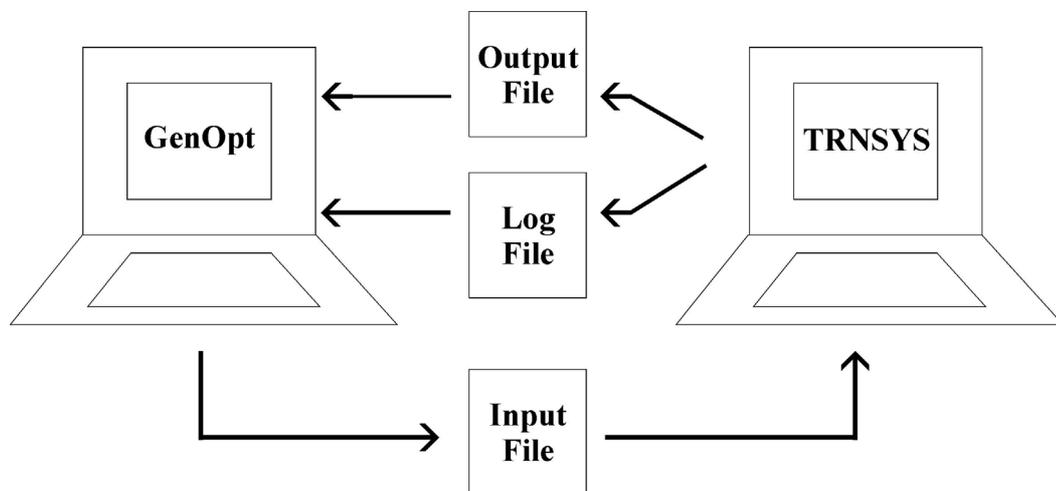
$$\bar{X} \stackrel{\Delta}{=} \left\{ \vec{x} \in R^n \mid l^i \leq x^i \leq u^i, i = 1, \dots, n \right\} \text{ e } -\infty \leq l^i \leq u^i \leq +\infty \text{ para } i = 1, \dots, n \quad (5.18)$$

Nas equações acima,  $\vec{x}$  representa o vetor contendo as variáveis do sistema a serem otimizadas,  $x^i$  é a  $i$ -ésima variável de otimização e  $\vec{X}$  é o conjunto das soluções possíveis para o problema de otimização, dadas as restrições de limite inferior,  $l^i$ , e superior,  $u^i$ , à cada  $x^i$ .11

O procedimento apresentado na seção acima, uma combinação de otimização multivariável com programação multiobjetivo, permite a otimização de um sistema de aquecimento solar, além de fornecer a curva de compromisso entre objetivos conflitantes, que por sua vez é usada para definir uma sobretaxa para o consumo de energia elétrica no horário de ponta.

#### 5.4 Metodologia de Otimização

No presente trabalho, os programas TRNSYS e GenOpt são acoplados de maneira a otimizar a função objetivo (Eq. 5.17), de acordo com o esquema mostrado na Fig. 5.4.



**Fig. 5.4** Esquema de otimização acoplando os programas TRNSYS e GenOpt.

TRNSYS simula o comportamento térmico anual do sistema de aquecimento solar para os perfis de consumo de água quente considerados e calcula a função objetivo, cujo valor é então escrito em um arquivo de saída (*output file*) acompanhada de um arquivo de registro de erros na simulação, caso eles existam (*log file*). Na ausência de erros, o valor da função objetivo é lido pelo programa GenOpt, que então procede com a otimização numérica. Novos valores das variáveis a serem otimizadas são definidas e escritas no arquivo de entrada (*input*

*file*) do TRNSYS, que é iniciado pelo GenOpt. Esse procedimento iterativo prossegue até que um ótimo da função objetivo seja encontrado. Foi usada uma série anual de dados de irradiação solar, temperatura ambiente e umidade relativa do ar, derivada a partir de 10 anos de dados medidos para a cidade de Florianópolis em uma estação radiométrica padrão BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*) (Abreu *et al.*, 2000).

A Tab. 5.1 apresenta o conjunto de variáveis otimizadas no presente trabalho, juntamente com as restrições aos seus valores máximos e mínimos definidos de forma genérica na Eq (5.18).

**Tab. 5.1 Conjunto de variáveis otimizadas**

Variável	Unidade	Descrição	Restrição
$A_C$	[m <sup>2</sup> ]	Área do coletor	$0,5 \leq A_C \leq 5$
$V_{RT}$	[m <sup>3</sup> ]	Volume do reservatório térmico	$0,05 \leq V_{RT} \leq 0,5$
$T_{Th}$	[°C]	Temperatura do termostato	$5 \leq T_T \leq 50$
$\dot{Q}_{MAX-RT}$	[kW]	Potência máxima do sistema de aquecimento auxiliar do reservatório térmico.	$0 \leq \dot{Q}_{MAX-RT} \leq 5$
$\dot{Q}_{MAX-CE}$	[kW]	Potência máxima do chuveiro elétrico	$0 \leq \dot{Q}_{MAX-CE} \leq 10$

O desempenho de um algoritmo de otimização depende de como o problema é formulado. Na otimização multivariável, diz-se que um problema é mau-escalado quando uma mudança em uma direção de  $\vec{x}$  produz variações muito maiores no valor da função objetivo que mudanças de  $\vec{x}$  em outra direção (Nocedal & Wright, 1999). Para impedir que a ordem de grandeza dos valores absolutos das variáveis otimizadas sejam diferentes, redefinem-se as variáveis de otimização através da soma do valor mínimo admitido com o resultado da multiplicação do valor máximo pela nova variável otimizada, cujo valor deve estar no intervalo de 0 a 1. Assim,

$$P^i = P^i_{MIN} + \varepsilon^i P^i_{MAX} \quad \text{onde } 0 \leq \varepsilon^i \leq 1 \quad (5.19)$$

onde  $P^i$ ,  $P^i_{MIN}$  e  $P^i_{MAX}$  são os valores simulados, máximo e mínimo da *i*-ésima variável do sistema, e  $\varepsilon^i$  é a *i*-ésima variável otimizada pelo GenOpt.

O valor dos parâmetros encontrados pelo algoritmo de otimização não é necessariamente um ótimo global da função objetivo proposta (Eq. 5.17). A função objetivo pode apresentar mínimos locais e a natureza dos programas usados pode levar o algoritmo a achar soluções não ótimas. Nesses programas, o cálculo da função objetivo depende da solução de um sistema de equações diferenciais acopladas a equações algébricas e de uma forma geral, uma solução exata não é obtida, mas sim uma aproximação numérica da solução. Os critérios de convergência dos *solvers* que são usados para resolver as equações diferenciais e algébricas dependem das variáveis independentes. Assim, uma perturbação nas variáveis independentes pode causar uma mudança na seqüência de iterações do *solver*, o que causa descontinuidades na aproximação da função objetivo. Conseqüentemente, uma direção que causa uma redução na função objetivo aproximada pode não fazer o mesmo para a função objetivo exata, fazendo com que o algoritmo de otimização estacione em pontos que não são ótimos. Para evitar que isso aconteça, três algoritmos de otimização são empregados em cada otimização. A solução que apresentar o menor valor da função objetivo é então escolhida. A natureza do problema pode permitir o aparecimento de múltiplos ótimos.

Os algoritmos de otimização recomendados para problemas cuja função objetivo seja avaliada pelo TRNSYS ou programas similares que simulam sistemas térmicos são o *Hybrid Generalized Pattern Search Algorithm with Particle Swarm Optimization Algorithm* (GPSPOCCHJ) e a implementação GPS do algoritmo Hook-Jeeves (Wetter, 2004) com múltiplos pontos iniciais. O primeiro algoritmo citado começa fazendo um *Particle Swarm Optimization* em uma malha por um número de gerações especificado pelo usuário. Posteriormente, o algoritmo inicializa o Hook-Jeeves *Generalized Pattern Search Algorithm* usando variáveis independentes da partícula com o menor valor da função objetivo. A implementação GPS do algoritmo Hook-Jeeves (GPSHJ) define uma malha inicial, a qual é então explorada. Caso não haja decréscimo na função objetivo em pontos da malha próximos à iteração atual, a distância entre os pontos da malha é reduzida e o processo repetido. O uso de múltiplos pontos iniciais reduz o risco de não encontrar um ótimo caso a função objetivo não seja continuamente diferenciável, que é o caso da função objetivo do presente trabalho. O terceiro algoritmo de otimização empregado é algoritmo Simplex de Nelder e Mead com a extensão de O'Neill (O'Neill, 1971) (NMEON). Esse algoritmo não avalia as derivadas no processo de otimização. Inicialmente um simplex n-dimensional é construído no espaço abrangido pelos parâmetros independentes. Em cada um dos vértices do simplex, o valor da função objetivo é avaliado. Em cada passo da iteração, o ponto com o valor mais alto da

função objetivo é substituído por outro ponto. O algoritmo consiste em três operações principais: reflexão do ponto, contração do simplex e expansão do simplex. O critério de convergência desse último algoritmo requer que a variância dos valores da função objetivo nos vértices do simplex seja menor que um limite prescrito. No entanto, se a função objetivo possuir grandes descontinuidades, o que tem sido observado em problemas de otimização com sistemas térmicos, pode ser que o critério de convergência nunca seja satisfeito. Por essa razão, entre outras, o uso deste algoritmo não é recomendado para tais problemas (Wetter, 2004). Não obstante, ele é incluído no processo de otimização como algoritmo complementar. Os valores dos parâmetros de simulação adotados, de acordo com a recomendação de Wetter (2004), são apresentados nas tabelas 5.2, 5.3 e 5.4. Para uma discussão mais detalhada sobre algoritmos de otimização para programas de simulação de sistemas térmicos, ver Wetter & Polak (2003) e Wetter & Wright (2003).

**Tab. 5.2** Parâmetros adotados do algoritmo de otimização *Hybrid Generalized Pattern Search Algorithm with Particle Swarm Optimization Algorithm*

Parâmetro do Algoritmo de Otimização	Valor
Neighborhood Topology	VonNeumann
NeighborhoodSize	3
NumberOfParticle	50
NumberOfGeneration	7
Seed	2
CognitiveAcceleration	2,8
SocialAcceleration	1,3
MaxVelocityGainContinuous	-0,5
MaxVelocityDiscrete	4
ConstrictionGain	1
MeshSizeDivider	2
InitialMeshSizeExponent	0
MeshSizeExponentIncrement	1
NumberOfStepReduction	6

**Tab. 5.3 Parâmetros adotados da implementação GPS do algoritmo Hook-Jeeves**

Parâmetro do Algoritmo de Otimização	Valor
MultiStart	Uniform
Seed	3
NumberOfInitialPoint	5
MeshSizeDivider	2
InitialMeshSizeExponent	0
MeshSizeExponentIncrement	1
NumberOfStepReduction	6

**Tab. 5.4 Parâmetros adotados do algoritmo Simplex de Nelder e Mead com a extensão de O'Neill**

Parâmetro do Algoritmo de Otimização	Valor
Accuracy	0,1
StepSizeFactor	2
BlockRestartCheck	10
ModifyStoppingCriterion	true

### 5.5 Características técnicas do sistema simulado

O sistema de aquecimento solar simulado possui algumas dimensões padronizadas, constantes durante o processo de otimização. A razão entre o diâmetro e o comprimento de reservatório é fixada em dois. A espessura do isolamento do reservatório térmico,  $e_I$ , é mantida em 50mm. A altura da placa coletora é sempre 1,39m. Outros parâmetros do sistema de aquecimento solar dependem das variáveis otimizadas. Essa dependência é modelada de acordo com equações, as quais são listadas na Tab. 5.5. A Tab. 5.6 lista os valores dos parâmetros fixos a Tab. 5.7 lista os valores dos parâmetros econômicos.

**Tab. 5.5 Modelagem da dependência dos parâmetros do sistema de aquecimento com as variáveis otimizadas**

Parâmetro dependente	Símbolo	Equação	
Diâmetro do reservatório térmico	$H_{RT}$	$H_{RT} = \left( \frac{2 \cdot V_{RT}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$	(5.20)
Número de ascensores do coletor	$N_R$	$N_R = \text{Inteira} \left( 8 \frac{A_C}{H_C} + 0,5 \right)$	(5.21)
Comprimento dos cabeçotes	$H$	$H = \frac{A_C}{H_C}$	(5.22)
Comprimento do tubo de entrada do coletor	$L_i$	$L_i = 1,3 + \frac{H_{RT}}{2}$	(5.23)
Comprimento do tubo de saída do coletor	$L_o$	$L_o = 0,1 + \frac{H_{RT}}{2}$	(5.24)
Distância vertical entre a parte inferior do reservatório térmico e o retorno do coletor	$H_R$	$H_R = 0,6 \cdot H_{RT}$	(5.25)
Coefficiente global de transferência de calor do reservatório térmico <sup>18</sup>	$(UA)_{RT}$	$(UA)_{RT} = k_I \cdot \pi \left[ \frac{4 \cdot H_{RT}}{\ln \left( \frac{H_{RT} + 2 \cdot e_I}{H_{RT}} \right)} + \frac{H_{RT}^2}{2 \cdot e_I} \right]$	(5.26)
Altura entre a superfície inferior do reservatório térmico e o resistor de aquecimento	$H_{AUX}$	$H_{AUX} = 0,5 \cdot H_{RT}$	(5.27)
Altura entre a superfície inferior do reservatório térmico e o termostato	$H_{Th}$	$H_{AUX} = 0,45 \cdot H_{RT}$	(5.28)
Volume do isolamento	$V_I$	$V_I = V_{RT} \left[ \left( 1 + \frac{2 \cdot e_I}{H_{RT}} \right)^2 \left( 1 + \frac{e_I}{H_{RT}} \right) - 1 \right]$	(5.29)

<sup>18</sup> Considerando apenas a resistência térmica de condução unidimensional do isolamento.

**Tab. 5.6 Parâmetros construtivos e operacionais do coletor solar e reservatório térmico**

Parâmetro	Símbolo	Valor
Coefficiente linear da curva de rendimento do coletor	$F_R(\tau\alpha)_n$	0,67
Negativo do coeficiente angular da curva de rendimento do coletor	$F_R U_L$	20,661 kJ/(m <sup>2</sup> hK)
Vazão mássica por área de coletor usada para obtenção da curva de rendimento	$G_{teste}$	60 kg/(m <sup>2</sup> h)
Coefficiente de modificação do ângulo de incidência	$b_0$	0,163
Inclinação do coletor	$\beta$	37,6°C
Diâmetro dos ascensores	$d_R$	14,2 mm
Diâmetro dos cabeçotes	$d_H$	27 mm
Altura entre a saída e entrada do coletor	$H_c$	0,836 m
Altura entre a saída do reservatório térmico e a entrada no coletor	$H_o$	0.836 m
Número de nós usados para simular o coletor	$N_x$	20
Diâmetro do tubo de entrada do coletor	$d_i$	15 mm
Número de joelhos (ou equivalente) no tubo de entrada do coletor	$NB_1$	4
Coefficiente de transferência de calor do tubo de entrada e isolamento	$U_i$	2,0 kJ/(m <sup>2</sup> hK)
Diâmetro do tubo de saída do coletor	$d_o$	19 mm
Número de joelhos (ou equivalente) na saída do coletor	$NB_2$	4
Coefficiente de transferência de calor do tubo de saída e isolamento	$U_o$	2,0 kJ/(m <sup>2</sup> hK)
Calor específico do fluido de trabalho	$c_p$	4,19 kJ/(kgK)
Densidade do fluido de trabalho em condições padrão	$\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de condutividade térmica do fluido no reservatório	$k_w$	2 kJ/(mhK)
Razão entre a espessura de isolamento entre a superfície superior e a inferior do reservatório térmico	$r_i$	1
Temperatura inicial da região de pré-aquecimento do reservatório térmico	$T_l$	50°C
Histerese do termostato	$\Delta T_{db}$	0°C

**Tab. 5.7 Parâmetros econômicos adotados.**

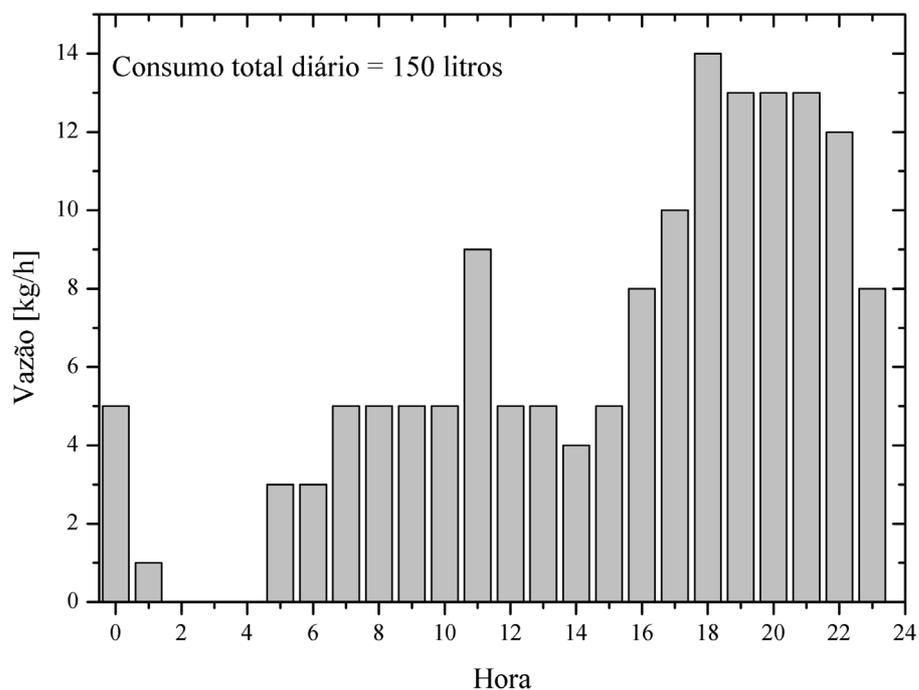
Parâmetro	Valor
$C_A$	83,33 US\$/m <sup>2</sup>
$C_E$	US\$ 66,67
$C_{A-RT}$	104,00 US\$/m <sup>2</sup>
$C_P$	5,56 US\$/m <sup>2</sup>
$C_I$	59,80 US\$/m <sup>3</sup>
$r_{TA}$	0,0924
$r_M$	0.005
$d$	0,06
$i_F$	0,04
$i_M$	0,06
$N_E$	20 anos

### 5.6 Perfil de consumo de água quente

Cragan *et al.* (1995) argumentam que, para levantar o impacto médio de um sistema de aquecimento solar sobre a concessionária de energia elétrica e o meio ambiente, é necessário simular um grande número de perfis de consumo de água quente. A quantidade de horas de simulação necessária para investigar o efeito de um único sistema de aquecimento solar chega a 8.760.000 (1000 perfis X 8760 horas no ano). Segundo os autores, o uso de um perfil característico de apenas uma residência apresenta picos de vazão. Ao usar o consumo médio de água quente de um conjunto de residências os picos são atenuados. Do ponto de vista da concessionária, o efeito sobre sua operação é o do consumo médio e não o consumo “realista” de apenas uma residência. No entanto, a simulação de um sistema de aquecimento auxiliar do tipo *on/off* no reservatório térmico com um perfil médio apresenta picos de demanda que, mais uma vez, não representam o efeito médio dos sistemas sobre a concessionária. A solução mais correta para o problema é a simulação de um grande número de perfis realistas com aquecimento auxiliar do tipo *on/off* no reservatório térmico, mediando os resultados de todas as simulações. Isso exige um tempo de simulação impraticável. Uma outra solução, aproximada, é simular apenas o perfil médio de consumo de água quente com um sistema de aquecimento auxiliar do tipo proporcional, que fornece apenas a quantidade de energia

necessária para atingir a temperatura desejada no reservatório térmico. Dessa forma, o demanda de energia elétrica acompanha o perfil de consumo médio, deixando de apresentar picos. Comprovou-se este fato mediante a realização de simulações com 100 perfis diferentes de consumo de água quente e um aquecedor do tipo *on/off*, com o perfil médio e um aquecedor do tipo *on/off* e com um perfil médio e um aquecedor proporcional. A demanda média obtida com a média da simulação dos 100 perfis e a simulação de um único perfil médio com aquecedor proporcional praticamente coincidem.

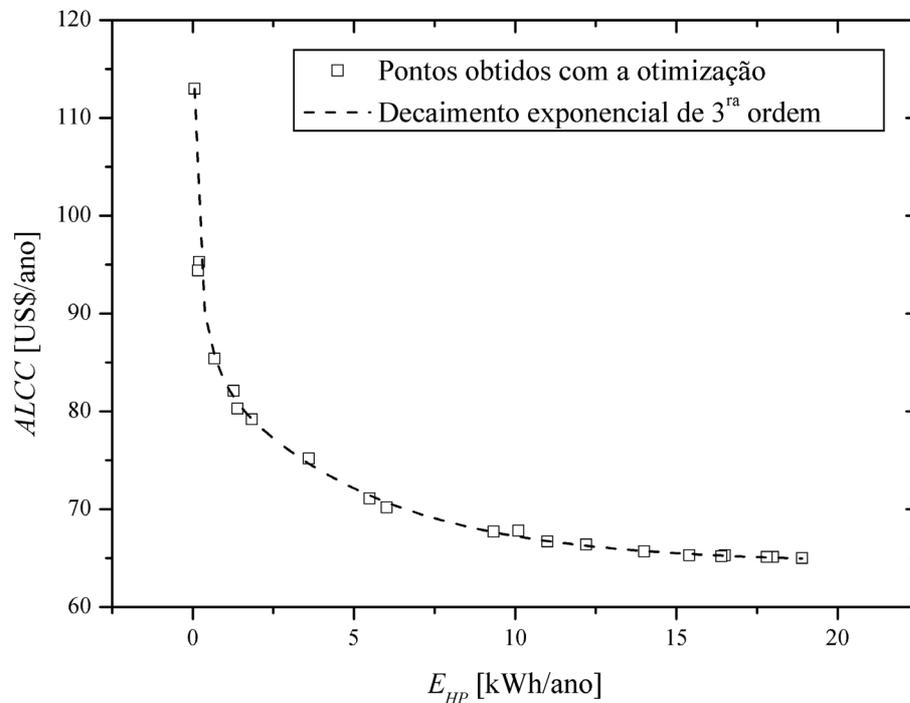
As figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 foram usadas para obtenção do perfil de consumo médio de água quente. A unidade destes gráficos é de energia, sendo que os perfis de consumo de água quente usados pelo TRNSYS devem apresentar o intervalo de consumo de água quente e a vazão durante esse intervalo. A informação necessária para a conversão de unidades de energia para vazão, temperatura de banho, duração de banho e temperatura de água fria, não existem. A solução adotada foi assumir um consumo total diário de água quente, no caso 150 l, considerando uma média de três habitantes por residência. Os perfis de consumo de energia medidos foram então usados para estabelecer o percentual de consumo em cada hora do dia. O perfil de consumo de água resultante é mostrado na Fig. 5.5.



**Fig. 5.5 Perfil de consumo de água quente usado na otimização.**

## 5.7 Resultados e Discussão

Durante o processo de otimização, o parâmetro  $\phi$  foi variado de 0 a 1 em intervalos regulares de 0,05. Posteriormente, um refino entre os valores de 0 a 0,05 com incremento de 0,01 foi realizado. O algoritmo que obteve o melhor desempenho foi o GPSPS0CCHJ, sendo que em apenas um ponto o valor da função objetivo obtido pelo algoritmo GPSHJ foi menor. O algoritmo NMEON não completou nenhuma otimização com êxito, em razão dos problemas discutidos por Wetter (2004). A Fig. 5.6 mostra os pontos obtidos com a simulação, juntamente com uma curva ajustada de decaimento exponencial de terceira ordem, dada pela Eq. 5.30.



**Fig. 5.6** Curva de compromisso obtida com a otimização

$$ALCC = A_0 + A_1 \exp\left(\frac{-E_{HP}}{t_1}\right) + A_2 \exp\left(\frac{-E_{HP}}{t_2}\right) + A_3 \exp\left(\frac{-E_{HP}}{t_3}\right) \quad (5.30)$$

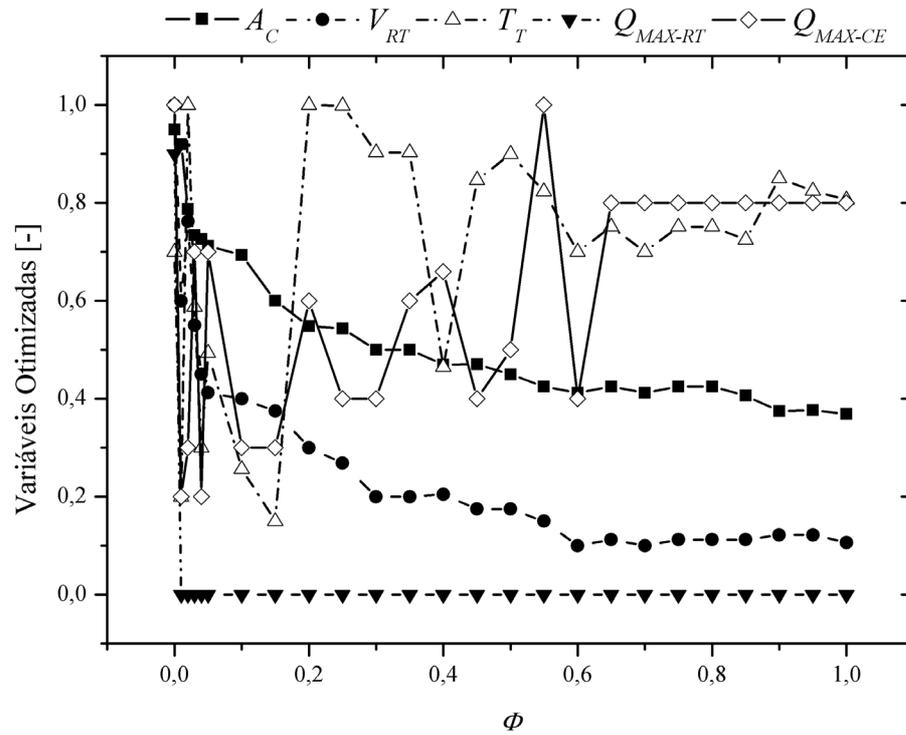
Os valores dos coeficientes da Eq. 5.30 são apresentados na Tab. 5.8, juntamente com outras informações estatísticas relevantes.

**Tab. 5.8 Coeficientes do ajuste com decaimento exponencial de terceira ordem**

$R^2 = 0,999$		
Parâmetro	Valor	Erro
$A_0$	64,53316	0,25871
$A_1$	254,40085	229,73084
$t_1$	0,01995	0,06102
$A_2$	15,65505	1,87017
$t_2$	0,38611	0,08944
$A_3$	21,18332	0,8027
$t_3$	4,789	0,35295

Na Tab. 5.8.,  $R^2$  é o coeficiente de determinação, que mede o quanto o ajuste é bem sucedido na explicação da variação dos dados ( $0 \leq R^2 \leq 1$ ).

A curva obtida na Fig. 5.6 é qualitativamente semelhante àquela apresentada na Fig. 5.2, podendo ser identificadas as regiões anteriormente mencionadas. No caso específico, o consumo anual de energia no horário de ponta pode ser praticamente anulado. A Fig. 5.7 apresenta os valores normalizados das variáveis otimizadas,  $\varepsilon^i$ , onde  $1 \leq \varepsilon^i \leq 1$  e a Tab. 5.9 apresenta os valores reais das variáveis otimizadas.



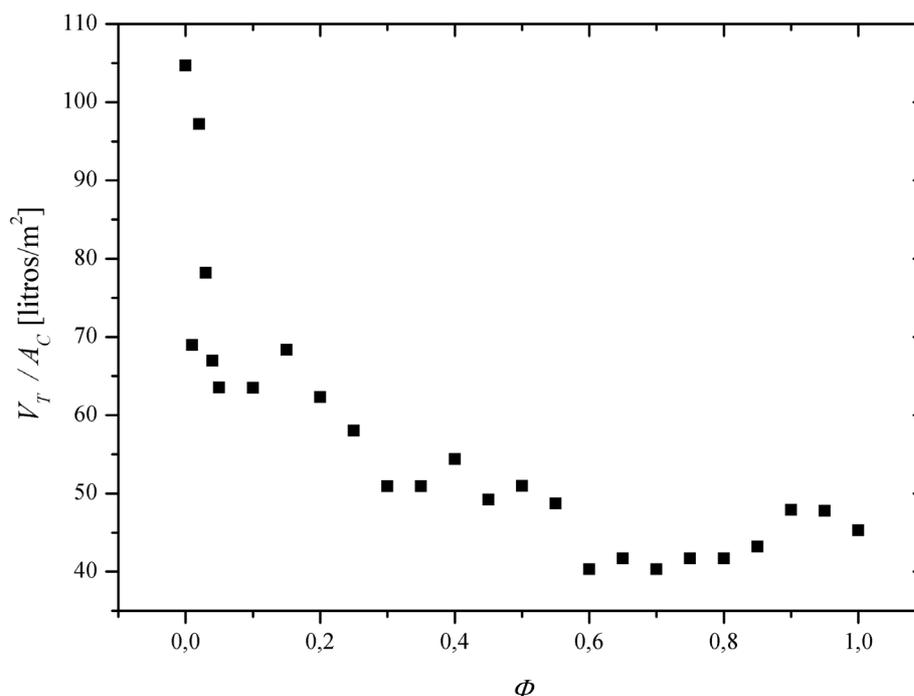
**Fig. 5.7** Valores normalizados das variáveis otimizadas para a obtenção da curva de compromisso.

**Tab. 5.9** Valores reais das variáveis otimizadas para a obtenção da curva de compromisso.

$\phi$ [-]	$A_C$ [m <sup>2</sup> ]	$V_{RT}$ [litros]	$T_{Th}$ [°C]	$\dot{Q}_{MAX-RT}$ [kW]	$\dot{Q}_{MAX-CE}$ [kW]
0,00	4,8	500,0	36,5	4,5	10,0
0,01	4,6	320,0	14,0	0,0	2,0
0,02	4,0	393,1	50,0	0,0	3,0
0,03	3,8	297,5	31,4	0,0	7,0
0,04	3,8	252,5	18,5	0,0	2,0
0,05	3,7	235,6	27,2	0,0	7,0
0,10	3,6	230,0	16,5	0,0	3,0
0,15	3,2	218,8	11,8	0,0	3,0
0,20	3,0	185,0	50,0	0,0	6,0
0,25	2,9	170,9	49,9	0,0	4,0
0,30	2,8	140,0	45,6	0,0	4,0
0,35	2,8	140,0	45,6	0,0	6,0
0,40	2,6	142,3	25,9	0,0	6,6
0,45	2,6	128,8	43,1	0,0	4,0
0,50	2,5	128,8	45,5	0,0	5,0
0,55	2,4	117,5	42,1	0,0	10,0
0,60	2,4	95,0	36,5	0,0	4,0
0,65	2,4	100,6	38,8	0,0	8,0
0,70	2,4	95,0	36,5	0,0	8,0
0,75	2,4	100,6	38,8	0,0	8,0
0,80	2,4	100,6	38,8	0,0	8,0

$\phi$	$A_C$	$V_{RT}$	$T_{Th}$	$\dot{Q}_{MAX-RT}$	$\dot{Q}_{MAX-CE}$
[-]	[m <sup>2</sup> ]	[litros]	[°C]	[kW]	[kW]
0,85	2,3	100,6	37,6	0,0	8,0
0,90	2,2	104,8	43,3	0,0	8,0
0,95	2,2	104,8	42,1	0,0	8,0
1,00	2,2	97,8	41,3	0,0	8,0

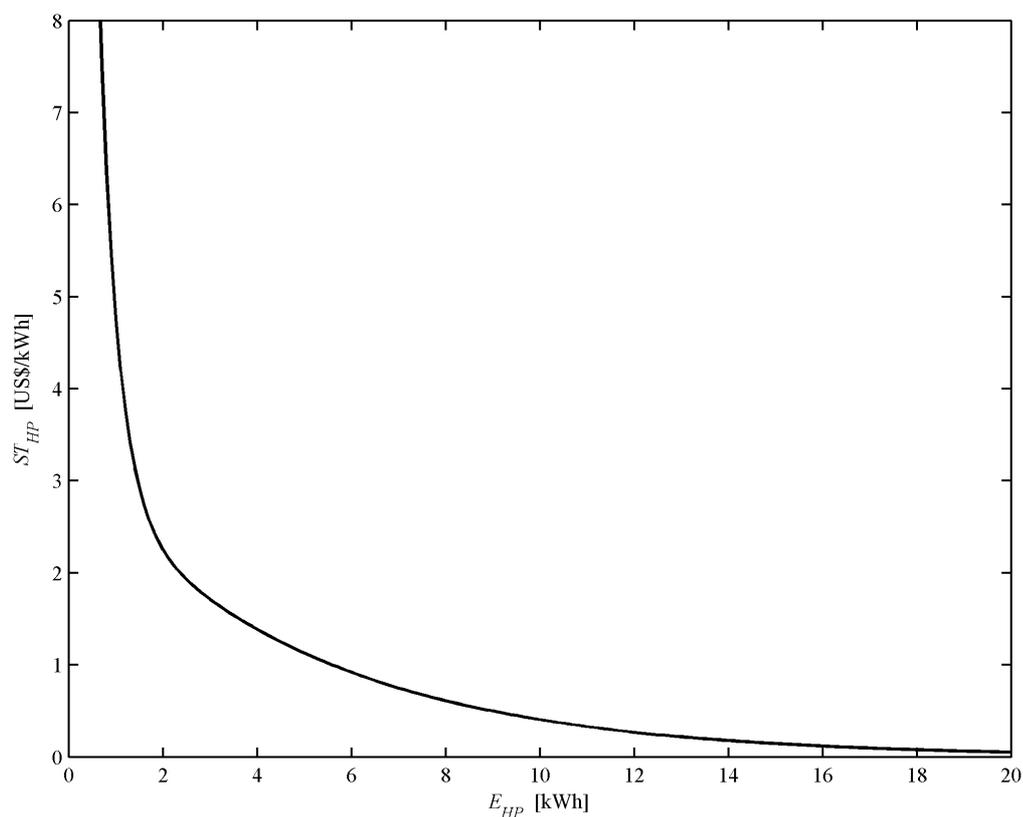
A análise da Fig. 5.7 permite concluir que as variáveis mais relevantes são  $A_C$  e  $V_{RT}$ , que diminuem seus valores com o aumento de  $\phi$ . Para todos os valores de  $\phi$ , com exceção de  $\phi = 0$ ,  $\dot{Q}_{MAX-RT} = 0$ . Em função disso, o valor de  $T_T$  não afeta a função objetivo, razão pela qual essa variável apresenta um comportamento errático. A variável  $\dot{Q}_{MAX-CE}$  apresenta uma tendência a aumentar com valores crescentes de  $\phi$ . O fato dessa variável também apresentar um comportamento irregular, com variações bruscas entre valores adjacentes de  $\phi$ , é explicado pelo tipo de chuveiro elétrico, com ajuste contínuo de potência. Desde que o chuveiro elétrico atenda a demanda máxima de potência durante o ano, um valor de  $\dot{Q}_{MAX-CE}$  superior continuará atendendo a demanda máxima, sem afetar a função objetivo. Dessa forma, o progresso da variável  $\dot{Q}_{MAX-CE}$  deve ser observada pelos pontos inferiores da curva. Um aspecto interessante é observar o comportamento da razão  $V_T / A_C$ , para os diversos valores de  $\phi$ , Fig. 5.8.



**Fig. 5.8 Razão entre o volume do reservatório térmico e a área de placa coletora para os valores de  $\phi$ .**

Ao dar ênfase no consumo durante o horário de ponta, a relação  $V_T / A_C$  aumenta substancialmente, como uma maneira de garantir uma quantidade suficiente de água quente e ao mesmo tempo manter o coletor operando em uma região de elevada eficiência. O reservatório térmico, que tem as suas dimensões aumentadas, permite uma maior estratificação. Ao enfatizar o *ALCC*, a relação  $V_T / A_C$  diminui, a estratificação é menor, e a eficiência, assim como a fração solar, do sistema diminuem como um todo.

A sobretaxa a ser cobrada durante o horário de ponta depende da solução tecnológica adotada, tendo seu valor determinado pela aplicação da Eq. 5.13 ao ajuste exponencial obtido na Eq. 5.30. O resultado é mostrado na Fig. 5.9.



**Fig. 5.9 Valor da sobretaxa cobrada pelo consumo durante o horário de ponta.**

O comportamento de  $ST_{HP}$  tem a mesma forma da Eq. 5.30 devido à sua natureza exponencial. Os resultados numéricos da Fig. 5.9 servem apenas como indicativo. Um número maior de consumidores e um período prolongado de medição são necessários para a obtenção de valores confiáveis. Deve ser ressaltado que a metodologia aplicada refere-se a uma sobretaxa a ser cobrada pelo consumo no horário de ponta, não incluindo custos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

## 6 Conclusões e Sugestões

O presente trabalho conseguiu alcançar os objetivos inicialmente propostos, de estabelecimento de uma metodologia de levantamento do potencial de economia e redução no pico da curva de demanda de energia elétrica no horário de ponta para consumidores de baixa renda através do uso de sistemas de aquecimento solar compactos, de validação do modelo computacional do coletor solar do *software* TRNSYS, e de otimização econômica de parâmetros construtivos com uso da programação multiobjetivo para um grupo de consumidores com perfis de consumo de água quente variados.

Os resultados da validação mostraram que o código computacional do TRNSYS é capaz de prever a quantidade de calor entregue pelo sistema de aquecimento solar com acurácia, apresentando um erro máximo de 1% nos dias simulados, além de prever o comportamento do sistema como um todo de maneira satisfatória. As discrepâncias maiores são observadas no início e ao fim do dia, períodos em que a irradiação solar é baixa e a vazão mássica no coletor também, tendo assim, um efeito reduzido sobre o balanço global de energia do sistema. Contudo, caso deseje-se avaliar o impacto médio de um sistema ao longo de sua vida útil, arquivos meteorológicos tratados estatisticamente são imprescindíveis. Infelizmente, no Brasil a disponibilidade desses dados, por hora, é muito restrita.

A análise de quatro meses de dados de medição *in situ*, de fevereiro a maio de 2004, permitiu levantar uma série de informações importantes sobre hábitos de consumo de água quente e o impacto do sistema de aquecimento solar sobre a demanda da concessionária de energia elétrica. Verificou-se que a maioria dos consumidores apresenta um perfil noturno de consumo de água quente (73,0%), seguido do vespertino (16,6%), matutino (9,3%) e do de madrugada (1,1%). A participação do chuveiro elétrico no consumo total de energia das residências está em torno de 20% a 25% para moradores sem o sistema de aquecimento solar em torno de 15% a 26% para os consumidores com sistema de aquecimento solar. A fração solar média para o período foi de 51%. Houve uma redução no pico da curva de demanda que chegou a ser de 62%. Não obstante, em períodos prolongados de céu encoberto ou chuva, o sistema de aquecimento solar deixa de funcionar, não sendo, portanto, um meio definitivo de eliminar o pico da curva de demanda. Uma alternativa já em investigação é o uso do pré-aquecimento do reservatório térmico com informações da previsão meteorológica para uma

janela de 24 horas, de forma a aquecer a água de madrugada, fora da ponta, de maneira a atender a demanda do dia seguinte.

Uma vez validado o modelo do coletor solar e com uma série de dados medidos sobre hábitos de consumo de água quente, foi possível usar um perfil real de consumo de água quente para determinar a curva de compromisso entre dois objetivos conflitantes, da concessionária de energia elétrica e do consumidor. O primeiro deseja reduzir o consumo anual no horário de ponta enquanto o segundo busca o menor custo anual possível. A curva levantada fornece a sobretaxa a ser cobrada para o consumo no horário de ponta, assim como um indicativo da tecnologia a ser adotada para cada “solução” escolhida. Tal metodologia é muito importante para os gestores do setor elétrico.

Os resultados que foram apresentados servem apenas como estimativas em função do número limitado de consumidores incluídos na análise e do período restrito de medição. A complementação dos dados de consumo de energia elétrica com medição de vazão de água quente consumida faz-se necessária. A principal contribuição almejada é a proposição de uma metodologia bem fundamentada, a qual pode ser aplicada em outras regiões do País.

## 7 Referências Bibliográficas

- ABRAMS, D.W., SHEDD, A.C., *Effect of seasonal changes in use patterns and cold inlet water temperature on water heating loads*, ASHRAE Transactions, vol.102, pp. 1038-1053, 1996.
- ABREU, S. L. *Utilização da energia solar em substituição a chuveiros elétricos*. Em: MONTENEGRO, A.A. (Ed). *Fontes não convencionais de energia: as tecnologias Solar, Eólica e de Biomassa*, pp.123-135, Florianópolis, 2000.
- ABREU S. L., COLLE S., ALMEIDA A. P., MANTELLI S. L. *Qualificação e Recuperação de Dados de Radiação Solar Medidos em Florianópolis*, Proceedings ENCIT 2000 – 8th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, 3-6 October, Porto Alegre, Brazil, 2000.
- ALMEIDA M.A., SCHAEFFER R., ROVERE E.L., *The potential for electricity conservation and peak load reduction in the residential sector of Brazil*. Energy (26), pp 413-429, 2001.
- ANEEL. *Resolução N° 334, de 2 de dezembro de 1999*.  
<http://www3.aneel.gov.br/indexren.htm>
- BELLARMINE, G.T., TURNER, M.C., *Energy conservation and management in the U.S*. Energy Conserv. Mgmt., vol. 35 no. 4, pp.363-373, 1994.
- BORGES, T.P.F, COLLE, S., *Impactos da adoção de tarifas diferenciadas de energia elétrica sobre o projeto otimizado de sistemas de aquecimento solar de água*, submetido ao VII Congresso Iberoamericano de Energia Solar, 14 a 18 de setembro, Vigo, Espanha, 2004.
- BORGES, T.P.F., CORREIA, P.B., *Non-linear optimization model for domestic solar water heaters*, Proceedings of the 1998 American Solar Energy Society Annual Conference, 14-17 June, Albuquerque, United States, pp. 297-300, 1998.
- BRANDEMUEHL, M.J., BECKMAN, W.A., *Economic evaluation and optimization of solar heating systems*. Solar Energy, (23) pp.1-10, 1979.

- BRANDEMUEHL, M.J., BECKMAN, W.A., *Transmission of diffuse radiation through CPC and flat plate collector glazings*. Solar Energy (24), pp. 511-513, 1980.
- CELESC - *Caracterização da Carga*, Relatório Interno Final, 2004.
- CLOSE, D. J. *The performance of solar water heaters with natural circulation*. Solar Energy (6), pp.33-40, 1962.
- COLLE, S., ABREU, S.L., GLITZ, K. & COLLE, F., *Optimization of the auxiliary heating and water storage insulation of a low cost domestic hot water heating system with an electric shower*. Proceedings ISES 2001 - Solar World Congress, 25-30 November, Adelaide, Australia, pp. 993-1001, 2001.
- CRAGAN, K.E., ARNY, M.D., KLIEN, S.A., BECKMAN, W.A., *The impact of an ensemble of solar domestic water heating systems on a utility*. Advances in Solar Energy, vol. 10, pp.107-163, American Solar Energy Society, Inc., Boulder, EUA, 1995.
- DOE - DEPARTMENT OF ENERGY, *Electric Utility Demand-Side Management 1999*  
[http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/dsm99/dsm\\_sum99.html](http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/dsm99/dsm_sum99.html) acessado em 01/04/2004a.
- DOE - DEPARTMENT OF ENERGY, *Annual Energy Outlook 2004*, Janeiro, 2004b.
- EIA - ENERGY INFORMATION AGENCY - *Annual Electric Utility Data File EIA-861*, 1990.  
<http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/page/eia861.html> acessado em 12/04/2004
- ELETROBRÁS. *Plano Nacional de Energia Elétrica 1993/2015*, Abril de 1994.
- ELETROBRÁS. PROCEL. *Pesquisa de posse de eletrodomésticos e de hábitos de consumo*. Projeto 5.2.3. Rio de Janeiro, 1988.
- ELETROBRÁS, PROCEL. *Economia de Energia e Redução de Demanda na Ponta em 1996 e Revisão dos Resultados Obtidos entre 1993-1995*, Janeiro de 1997.
- GELLER H., JANNUZZI G.M., SCHAEFFER R., TOLMASQUIN M.T. *The efficient use of electricity in Brazil: progress and opportunities*. Energy Policy (26) 859-872, 1998.
- HEGAZY, A.A., DIAB, M. R., *Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water heaters*. Applied Energy, (71) pp. 287-306, 2002.

- IBGE - *Censo Demográfico 1991. Média de moradores por domicílio e por situação (urbana e rural), segundo as unidades territoriais*, 1991.
- ISO, ISO9806, *Thermal performance test for solar collectors*, 1994.
- JANNUZZI G.M. *Residential energy demand in Brazil by income classes*. Energy Policy (17) 254-263, 1989.
- JANNUZZI G.M., SCHIPPER L. *The structure of electricity demand in the Brazilian household Sector*. Energy Policy (19) 879-891, 1991.
- JÓNSSON G.R., HOLTSBERG, A. AND JÓNSSON, V.K., *A modelling technique for estimating hot tap water consumption in district heating systems*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part A – Journal of Power and Energy*, vol. 208, pp. 79-87, 1994.
- JORDAN, U., VAJEN K., *Influence of the DHW load profile on the fractional energy savings: a case study of a solar combi-system with TRNSYS simulations*. Solar Energy, vol. 69, pp. 197-208, 2000.
- KALOGIROU, S.A., *Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms*. Applied Energy, (77), pp.383-405, 2004.
- KALOGIROU, S.A., PAPAMARCOU, C., *Modelling of a thermosyphon solar water heating system and simple model validation*. Renewable Energy (21), pp.471-493, 2000.
- KLEINBACH, E.M., BECKMAN, W.A., KLEIN S.A., *Performance study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks*. Solar Energy (50) pp. 155-156, 1993.
- KNUDSEN, S., *Consumers' influence on the thermal performance of small SDHW systems-theoretical investigations*. Solar Energy, vol. 73, pp. 33-42, 2002.
- LANGHAAR, H.L., *Steady flow in the transition length of a straight tube*. ASME J. Applied Mechanics (9), pp.55-58, 1942.
- LOWENSTEIN A., HILLER C.C., *Disaggregating residential hot water use*. ASHRAE Transactions, vol. 102, pp. 1019-1027, 1996.
- LOWENSTEIN A., HILLER, C.C., *Disaggregating residential hot water use – part II*. ASHRAE Transactions, pp. 1852-1863, 1998.

- MATAJS, R.R. *Demanda, consumo e custo das alternativas ao chuveiro elétrico: O exemplo do estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- MEYER, J.P. AND TSHIMANKINDA, M., *Domestic hot water consumption in South-African townhouses*. *Energy Convers. Mgmt*, vol. 39, pp. 679-684, 1998a.
- MEYER, J.P., TSHIMANKINDA, M., *Domestic hot-water consumption in South-African apartments*. *Energy*, vol. 23, pp. 61-66, 1998b.
- MICHAELIDES I.M., WILSON, D.R., *Simulation studies of the position of the auxiliary heater in thermosyphon solar water heating systems*. *Renewable Energy*, vol. 10, pp. 35-42, 1997.
- MORRISON G.L, BRAUN, J.E., *System modelling and operation characteristics of thermosyphon solar water heaters*. *Solar Energy* (34) pp. 389-405, 1985.
- MORRISON, G.L., RANATUNGA, D.B.J., *Thermosyphon circulation in solar collectors*. *Solar Energy* (24) pp.191-198, 1980.
- MORRISON, G.L., RANATUNGA, D.B.J., *Transient response of thermosyphon solar collectors*. *Solar Energy* (24) pp.55-61, 1980.
- MORRISON G.L., TRAN, H.N., *Simulation of long term performance of thermosyphon solar water heaters*. *Solar Energy* (33), pp.515-526, 1984.
- MÜLLER-STEINHAGEN, H., Test report – *Thermal performance of solar collector*, Acc. To EN 12975 – 2. 2001, n. 02COL273, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik – Universität Stuttgart, Alemanha, 2002.
- MUSLU, M., *Electrical dispatch with environmental considerations: tradeoff curves and emission reduction rates*. *Electr. Pow. Syst. Res.*, (71), pp.153-158, 2004.
- NIIMURA, T., NAKASHIMA, T., *Multiobjective tradeoff analysis of deregulated electricity transactions*. *Electr. Pow. Energ. Syst.* (25), pp.179-185, 2003.
- NOCEDAL, J., WRIGHT, S.J., *Numerical Optimization*. New York; Springer-Verlag, p. 27., 1999.

- OLIVA G. A., BORGES T.P.F., *Teste de campo piloto com pré-aquecedor solar de água para chuveiros elétricos de potência reduzida*. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia, 2087-2102, Rio de Janeiro, 22 a 25 de Outubro de 1996.
- OLIVA G.A., BORGES T.P.F., MARTINS G., *Desenvolvimento de tecnologia de pré-aquecedor solar de água para chuveiros elétrica reduzida*. Anais do XII Seminário Nacional da Distribuição de Energia Elétrica. Recife, 16 a 21 de Outubro de 1994.
- OLIVESKI, R.C., KRENZINGER, A., VIELMO, H.A., *Comparison between models for the simulation of hot water storage tanks*. Solar Energy (75), pp.121-134, 2003.
- O'NEILL R., *Algorithm AS 47-function minimization using a simplex procedure*. Appl. Stat. 20, 338-345., 1971.
- ONG, K. S., *A finite-difference method to evaluate the thermal performance of a solar water heater*. Solar Energy (16) pp. 137-147, 1974.
- ONG, K.S., *An improved computer program for the thermal performance of a solar water heater*. Solar Energy (18), pp. 183-191, 1976
- PAPAKOSTAS, K.T., PAPAGEORGIOU, N.E., SOTIROPOULOS, B.A., *Residential hot water use patterns in Greece*. Solar Energy, vol. 54, pp. 369-374, 1995.
- PEREIRA, E.M.D., MESQUITA, L.C.S., NETO, L.V.M., ROCHA, J.M.G., PEREIRA, L.T., BUONICONTRO, L.M.S., ARREGUY, E., CUNHA, D.A., *Solar water heating for social housing projects in Brazil: the Sapucaias Case*. SESCOI 2003 Conference Queen's University Kingston, Ontário, Canadá. August 18-20, 2003.
- PEREZ, R., STEWART, R., SEALS, R., GUERTIN, T., *The development and verification of the Perez diffuse radiation model*. Sandia National Laboratories Contractor Report, SAND88-7030, 1988.
- PRADO R.T.A., GONÇALVES O.M. *Water heating through electric shower and energy demand*. Energy and Buildings (29) 77-82, 1998.
- PROCEL – Resultados das Ações do Procel no Período 1994/2003.  
<http://www.eletrabras.com/procel/site/oprograma/resultados.asp> acessado em 04/05/2004

- REBITZER, G., EKVALL, T., FRISCHKNECHT, R., HUNKELER, D., NORRIS, G., RYDBERG, T., SCHMIDT, W.-P., SUH, S., WEIDEMA, B.P., PENNINGTON, D.W., *Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications*. Environ. Int. (30), pp.701-720, 2004.
- REINDL, D.T., BECKMAN, W.A., DUFFIE, J.A., *Evaluation of hourly tilted surface radiation models*. Solar Energy (45), pp. 9-17, 1990.
- SABESP – *Consumo normal de uma família de 4 pessoas com economia*, [http://www.sabesp.com.br/pura/noticias\\_dados/dados\\_consumo\\_normal\\_familia.htm](http://www.sabesp.com.br/pura/noticias_dados/dados_consumo_normal_familia.htm) acessado em 07/04/2004.
- SALAZAR, J.P.L.C., ABREU S., BORGES T.P.F., COLLE S., REGUSE W., *Optimization of a compact solar domestic hot water system for low-income families with peak demand and total cost constraints*. Proceedings of the ISES 2003 - Solar World Congress. 14 a 19 de Junho, Göteborg, Suécia, 2003.
- SHARIAH A.M., LÖF, G.O.G., *The optimization of tank-volume-to-collector-area ratio for a thermosyphon solar water heater*. Renewable Energy, vol. 7, pp. 289-300, 1996.
- SHARIAH A.M., LÖF, G.O.G., *Effects of auxiliary heater on annual performance of thermosyphon solar water heater simulated under variable operating conditions*. Solar Energy, vol. 60, pp.119-126, 1997.
- SHIN, M-S., KIM, H-K., JANG, D-S., LEE, S-N., LEE, Y-S., YOON, H-G., *Numerical and experimental study of a stratified thermal storage system*. Applied Thermal Engineering (24) pp. 17-27, 2004.
- SIOSHANSI, F.P., *Demand-side management and environmental externalities: Ramifications on utility resource planning*. Utilities Policy, vol. 2, no. 4, pp. 320-329, 1992.
- STAM, A., KUULA, M., CESAR, H., *Transboundary air pollution in Europe: an interactive multicriteria tradeoff analysis*. Eur. J. Oper. Res. (56), pp.263-277, 1992.
- STEUER, R.E., MULTIPLE CRITERIA OPTIMIZATION: THEORY, COMPUTATION AND APPLICATION. John Wiley & Sons, New York, pp. 165, 1986.
- TRAIN, K., *Discount rates in consumers' energy-related decisions: a review of the literature*. Energy, (10), pp.1243-1253, 1985.

- TRNSYS. A TRANSIENT SYSTEM SIMULATION PROGRAM. *Reference Manual Volume I*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison. March, 2000.
- TRZESNIEWSKI, J., MITCHELL, J.W., KLEIN S.A., BECKMAN, W.A., *Impact of a solar domestic hot water demand-side management program on an electric utility and its costumers*. American Solar Energy Society Annual Conference, pp. 366-373, 1996.
- VINE, E., DIAMOND, R., SZYDLOWSKI, R., *Domestic hot water consumption in four low-income apartment buildings*. Energy, vol. 12, pp. 459-467, 1986.
- WETTER, M., *GenOpt – A Generic Optimization Program*. In: Proceedings of the Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001.
- WETTER, M., *GenOpt - Generic Optimization Program*. User Manual, Version 2.0.0. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
- WETTER, M., POLAK, E., *A convergent optimization method using pattern search algorithms with adaptive precision simulation*. In: G. AUGENBROE AND J. HENSEN (editors), Proc. of the 8-th IBPSA Conference, volume III, pages 1393–1400, Eindhoven, NL, August 2003.
- WETTER, M., WRIGHT, J., *Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method*. In: G. AUGENBROE AND J. HENSEN (editors), Proc. of the 8-th IBPSA Conference, volume III, pages 1401–1408, Eindhoven, NL, August 2003.
- ZHIJUN, X., KUBY, M., *Supply-side-demand-side optimization and cost-environment tradeoffs for China's coal and electricity system*. Energy Policy (25), pp.313-326, 1997.
- ZVIRIN, Y., SHITZER, A., GROSSMAN, G. The natural circulation solar heater-models with linear and nonlinear temperature distributions. Int. J. Heat & Mass Transfer (20) pp. 997-999, 1977

## ANEXO A - Cálculo do Coeficiente Global de Transferência de Calor do Reservatório Térmico

O coeficiente global de transferência de calor do reservatório térmico,  $(UA)_{RT}$ , foi estimado experimentalmente, através do ajuste da curva teórica de resfriamento, dada pela Eq. (A.1), com os valores medidos, assumindo capacitância global.

$$\overline{T}_{RT} = T_{amb} + (\overline{T}_o - T_{amb}) \cdot \exp\left[-\frac{(UA)_{RT} \cdot (t - t_o)}{m_{RT} \cdot c_{RT}}\right] \quad (A.1)$$

onde  $\overline{T}_{RT}$  é a temperatura média,  $\overline{T}_o$  é a temperatura média inicial,  $m_{RT}$  é a massa e  $c_{RT}$  é o calor específico do volume de água contido no reservatório térmico. Os valores de  $\overline{T}_{RT}$  e  $\overline{T}_o$  são aproximados pela média entre as temperaturas na parte inferior e superior do reservatório térmico. A Eq. A.1 pode ser rearranjada, obtendo-se:

$$\ln \frac{T^*}{T_0^*} = -\frac{(UA)_{RT} \cdot (t - t_o)}{m_{RT} \cdot c_{RT}} \quad (A.2)$$

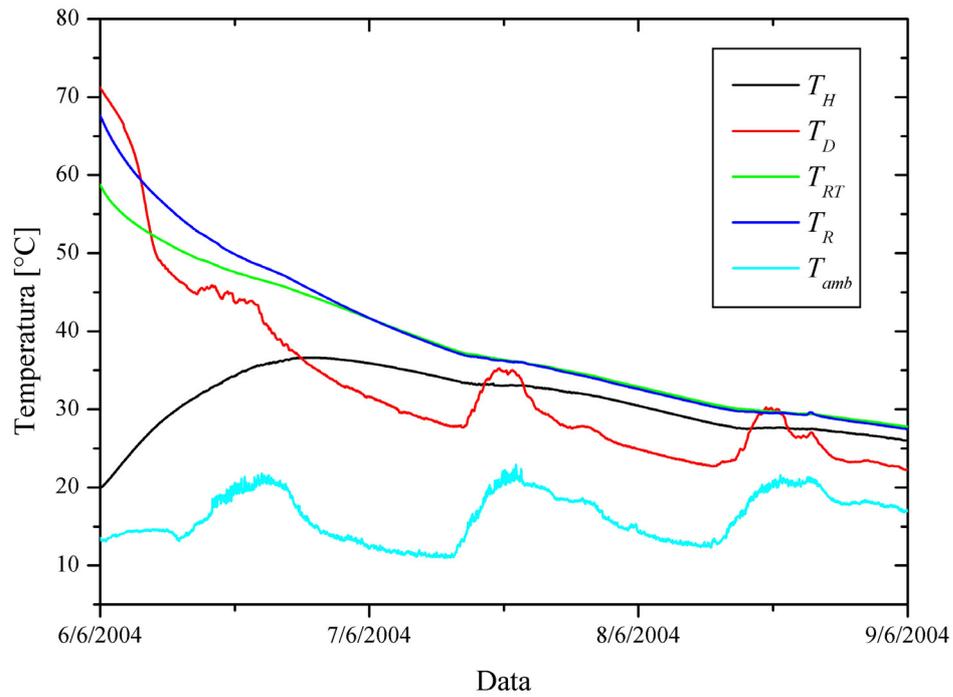
onde:

$$T^* = \overline{T}_{RT} - T_{amb} \quad (A.3)$$

$$T_0^* = \overline{T}_o - T_{amb} \quad (A.4)$$

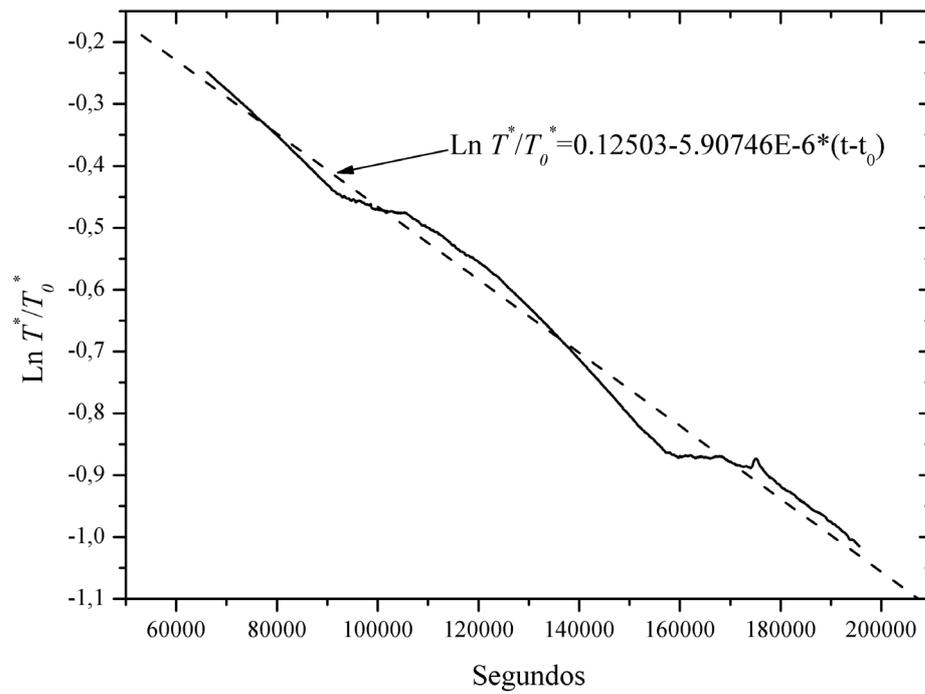
Assim, a Eq. A.2 é a equação de uma reta cujo coeficiente angular fornece o valor de  $(UA)_{RT}$ .

O reservatório térmico foi inicialmente aquecido até a temperatura de aproximadamente 75°C e deixado para resfriar até entrar em equilíbrio térmico com o ambiente. A curva de resfriamento é mostrada na Fig. A.1. A temperatura média do reservatório foi obtida a partir da média aritmética entre os valores de  $T_R$  e  $T_H$ .



**Fig. A.1 Curva de resfriamento do reservatório térmico**

Na dedução da Eq. A.1,  $T_{amb}$  é considerada constante, condição não cumprida durante a experiência. Assim, a média de  $T_{amb}$  ao longo do período de teste foi usado como aproximação de uma temperatura representativa. O trecho da curva usado vai do dia 6/6/2004 até o dia 9/6/2004. A Fig. A.2 apresenta a regressão linear obtida para a Eq. A.2.



**Fig. A.2 Regressão linear**

Substituindo os valores de  $m_{RT}$  e  $c_{RT}$  no coeficiente angular da regressão linear, obtém-se, para  $(UA)_{RT}$ , o valor de 8,06 kJ/h°C (2,24 W/°C).

O coeficiente global de transferência de calor obtido através deste procedimento inclui todas as resistências térmicas entre a massa de água e o ambiente.

## **Anexo B – Descrição da metodologia de seleção dos consumidores**

A população disponível era de aproximadamente 180 consumidores (famílias). O fato do sistema de aquecimento solar somente poder ser instalado nos apartamentos do segundo andar reduziu a população disponível para aproximadamente 87 consumidores (dos quais 60 foram selecionadas). A influência de características econômicas e sócio-culturais regionais sobre o consumo de água exige um estudo abrangente para a caracterização do perfil de consumo das várias regiões do país. Não existe um perfil de usuário típico para ser usado com referência. O levantamento de informações sobre consumo de água quente com uso de questionários apresenta ainda outros agravantes, pelo fato do tipo de informação coletada ser muitas vezes difícil de ser estimado pelo entrevistado. Não obstante, com a definição de critérios adequados, é possível selecionar um grupo homogêneo e que também seja adequado às dimensões do sistema de aquecimento solar.

### ***Metodologia***

A metodologia empregada fez uso de questionários aplicados por meio de entrevista com o objetivo de levantar o perfil de consumo de água quente em cada residência e com cada morador. A etapa inicial previu a distribuição de *folders* informativos sobre o projeto, funcionamento do sistema de aquecimento solar, aspectos legais e entidades envolvidas. Após a realização das entrevistas as informações foram armazenadas em um banco de dados. Posteriormente, critérios de seleção foram aplicados, resultando no conjunto final de 90 famílias. A seguir são abordados os itens questionário, entrevista, armazenamento de dados e critérios de classificação.

### ***Questionário***

O questionário é dividido em duas partes. A primeira parte é relativa a cada família e a segunda a cada morador. O questionário foi concebido com auxílio da CAIXA e de assistentes sociais, além de também ser baseado em um questionário aplicado em projeto de natureza similar na cidade de San Francisco-EUA em 1985 (Vine *et al.*, 1986).

O questionário possui um parágrafo explicando o propósito da pesquisa e assegurando o sigilo das informações fornecidas. Na primeira parte perguntas sobre renda familiar, número

de membros na família e possíveis alterações no cenário futuro (incremento ou diminuição do número de pessoas na família, períodos de ausência) são feitas.

A segunda parte é realizada separadamente para cada morador. Informações como idade, nível de escolaridade e número de banhos diários ou semanais são solicitados. Em seguida, o morador é perguntado sobre a duração, temperatura e hora de cada banho, e também sobre possíveis alterações durante o ano (verão, inverno, etc.). Ainda é incluída uma pergunta para confirmar se todos os banhos são tomados na residência, e em caso negativo, quais os dias em que os banhos não são tomados na residência.

As perguntas, na sua grande maioria, são fechadas, mas elaboradas de maneira a minimizar a redução das possibilidades de resposta. Além disso, opções como “Não sabe” e “Não soube responder” foram incluídas em todas as perguntas.

Procurou-se reduzir também o número total de perguntas ao estritamente necessário. Tendo em vista que parte do questionário é aplicada a cada morador, o fator tempo torna-se relevante. Algumas perguntas de caráter sócio-econômico também foram incluídas para verificação da existência de correlação entre o padrão de consumo de água quente e nível de escolaridade, sexo, idade, faixa de renda, etc.

### ***Entrevistas***

As entrevistas foram conduzidas por uma estudante de 7ª Fase do curso de Serviço Social, com experiência anterior na aplicação de questionários, entre os dias 13 e 31 de Janeiro de 2003. Esta pessoa recebeu instruções sobre o funcionamento do sistema de aquecimento solar e também sobre o projeto para esclarecimento de dúvidas que porventura viessem a surgir durante as entrevistas.

A entrevista foi realizada de tal maneira que, em causa de ausência dos demais moradores, a pessoa entrevistada forneceria informações sobre o hábito de consumo de água quente dos moradores não presentes. Naturalmente, a pessoa entrevistada pode, inconscientemente, estar estendendo seus hábitos aos demais. A entrevista individual com cada morador seria impraticável dentro do cronograma do presente estudo.

Um conjunto de entrevistas-teste no mês de Dezembro de 2002 foi realizado em companhia de um assistente social, da administradora do condomínio e de um engenheiro contratado pelo projeto. Assim, puderam ser detectadas algumas falhas/correções no questionário antes de começar o processo de entrevistas propriamente dito.

### ***Armazenamento dos Dados***

O software Access da Microsoft foi utilizado para construir uma base de dados. A entrada dos dados é feita através de um formulário muito semelhante ao próprio questionário e não exige domínio do software para seu uso.

### ***Crítérios de Classificação***

Os critérios de classificação usados foram o número de total de moradores no apartamento, número de banhos diários por pessoa e o número total de minutos no ano usando água quente/morna por família. A distribuição horária dos banhos durante o dia não foi usada como critério de classificação.

Segundo dados do IBGE (1991), o número médio de membros por domicílio na área urbana do estado de Santa Catarina é 3,9. No entanto, constatou-se que a média obtida dentro do condomínio residencial foi de 3,0 moradores com desvio padrão de 1,2. Estas famílias foram priorizadas durante o processo de seleção, já que buscamos uma amostra representativa. No entanto, verificou-se também a ocorrência de uma grande quantidade de famílias com dois, quatro e cinco integrantes.

Outro critério de classificação usado foi o número total de minutos de uso de água quente/morna por família. Este número foi estimado com base nas informações fornecidas nos questionários, levando em conta a duração dos banhos, dias da semana em que os banhos são tomados na residência, assim como em informações complementares fornecidas em um campo reservado a este fim. Banhos frios não foram computados uma vez que não representam uma demanda para o sistema de aquecimento solar. Infelizmente, não foi possível dimensionar o sistema de aquecimento solar para atender as necessidades específicas de cada família. As dimensões usadas foram as de um sistema comercialmente disponível. Baseado em medições realizadas no Laboratório de Energia Solar, com um sistema de aquecimento solar equivalente ao que será instalado no condomínio, uma vazão média de 4

l/min foi observada. Assim, computou-se o número total de minutos no ano de água quente/morna que o sistema de aquecimento solar teoricamente é capaz de fornecer, chegando a 10950 min. Esse número foi usado também como referência para a seleção das famílias. Não é de interesse fornecer um sistema superdimensionado nem subdimensionado às famílias, pois isto prejudicaria os resultados finais do projeto. Não obstante, em função da pequena margem de corte (em torno de 20 famílias), foi necessário “afrouxar” este critério, senão não seria possível selecionar as 60 famílias.

Em função da dificuldade aparente em estimar o tempo de duração do banho, resolveu-se usar também o número diário de banhos usando água quente/morna por pessoa, com relevância maior que o critério anterior. Este critério perde em qualidade da informação em relação ao anterior, desde que as estimativas fornecidas pelos entrevistados sejam realistas, mas também fornece um indicativo da quantidade de água consumida. O valor de referência para este critério foi considerado igual a média verificada em todas as famílias entrevistadas, de 1,6 banhos por dia e por pessoa de água quente/morna.

Os critérios acima mencionados foram usados em uma fórmula classificatória, chamada de desvio do comportamento ideal, DCI. Esta fórmula mede o desvio de cada critério de classificação do seu valor ideal e o normaliza em relação ao valor ideal. Cada parte da equação é multiplicada por um fator de peso relativo. As famílias que apresentaram menores DCI's foram contempladas.

$$DCI = \sum \frac{|C_i - VR_i|}{VR_i} P_i \quad (B.1)$$

onde  $C_i$  é o  $i$ -ésimo critério de classificação e  $VR_i$  é o respectivo valor de referência, dados na Tab. B.1.

**Tab. B.1 Critérios de Classificação, Valores de Referência e Pesos**

Critério	Identificação	Valor de Referência	Peso
Número de membros da família	$C_1$	4	3
Número total anual de minutos de banho quente/morno por família	$C_2$	10950 min	1
Número de banhos diários com água quente/morna por pessoa	$C_3$	1,6	2

É importante ressaltar que o valor DCI não é o único elemento classificatório. Uma família pode, por exemplo, ter um consumo próximo ao ideal para o sistema de aquecimento solar em questão e, no entanto, apenas tomar banhos longos no fim de semana. Durante a semana os banhos são tomados no local de trabalho. Neste caso o sistema de aquecimento solar não estará servindo ao seu propósito. Uma família com consumo não ideal, mas com banhos tomados no apartamento são preferenciais. Famílias com mudanças previstas no número de pessoas no apartamento também podem introduzir discrepâncias e dificuldades adicionais no tratamento dos dados, sendo, por isso, desfavorecidas em relação às demais.

### ***Resultados***

O resultado da análise dos questionários mostrou uma grande variação, mesmo dentro de famílias com o mesmo número de membros, no consumo de água quente. Acredita-se que este fato deve estar associado à dificuldade em estimar a duração total dos banhos. Em cada entrevista foi explicitamente colocado que a duração do banho refere-se ao tempo em que o registro do chuveiro permanece aberto, ou seja, ao período em que efetivamente há consumo de água. Alguns moradores relataram tempos de banho superiores a trinta minutos e de até sessenta minutos. Esses valores são bastante improváveis. A medição do volume de água consumido em base horária nas 90 famílias seria a única forma de levantar um perfil de consumo fiel. Esta medida exige uma quantidade de recursos não disponível dentro do orçamento do presente trabalho.

Existem ainda outros fatores que podem ter levado a distorções nas respostas dos moradores aos questionários. Teme-se que algumas famílias acreditassem que um maior uso de água quente os beneficiaria no processo de seleção, apesar de nenhuma informação sobre esse processo ter sido divulgada. Muitas vezes um morador respondia pelos outros que não estavam presentes. Este fato pode fazer com que a pessoa “estenda” seu perfil de consumo aos

demais. Enfim, nenhuma pesquisa é isenta de distorções e o papel daqueles que o divulgam é descrever detalhadamente a metodologia adotada, as restrições aos resultados e quaisquer particularidades relevantes.

### ***Comentários Finais***

O processo de seleção das famílias contempladas foi realizado usando os critérios considerados mais relevantes ao projeto. O peso relativo de cada critério foi modificado, com o intuito de verificar possíveis alterações significativas em outros cenários, que por sua vez não ocorreram. Em todas as etapas do processo procurou-se utilizar a experiência coletada em outros projetos realizados no Brasil e no exterior, mediante a bibliografia disponível. A participação de profissionais da área de serviço social também foi fundamental, principalmente na aplicação dos questionários e no levantamento de dúvidas frequentes dos moradores em relação ao projeto e ao funcionamento do sistema de aquecimento solar. A receptividade dos moradores do Condomínio Residencial Solar Buona Vita foi muito boa, sendo que apenas 5 dos 166 entrevistados não mostraram interesse algum pelo projeto e não quiseram responder aos questionários. Deve-se ressaltar, porém, que muitos moradores do andar térreo, os quais já tinham consciência de que não receberiam o sistema de aquecimento solar, revelaram um sentimento de insatisfação ao serem entrevistados. O folder explicativo ressaltou a importância da participação de todos os moradores para o sucesso do projeto

## Anexo C – Dados Estatísticos das Curvas de Calibração

[10/6/2004 15:25 "/Graph1" (2453166)]

Linear Regression for #105 T\_PLACA:

$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.66669	0.00318	837.88487	<0.0001
B	0.99954	5.91938E-5	16885.80265	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj.R-Square	Root-MSE (SD)	N
0.99999	0.99998	0.99998	0.09383	4489

Parameter	LCI	UCI
A	2.66045	2.67293
B	0.99942	0.99965

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model 1		2.51015E6	2.51015E6	2.8513E8
Error	4487	39.50138	0.0088	
Total	4488	2.51019E6		

Prob>F

<0.0001

[10/6/2004 15:34 "/Graph2" (2453166)]  
 Linear Regression for #106 T\_COLL\_IN:  
 $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.70978	0.00313	864.40345	<0.0001
B	0.99642	5.81649E-5	17130.88749	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj. R-Square	Root-MSE (SD)	N
0.99999	0.99998	0.99998	0.09248	4489

Parameter	LCI	UCI
A	2.70363	2.71593
B	0.9963	0.99653

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model 1		2.51015E6	2.51015E6	2.93467E8
Error	4487	38.37922	0.00855	
Total	4488	2.51019E6		

Prob>F

<0.0001

[10/6/2004 15:44 "/Graph3" (2453166)]

Linear Regression for #107 T\_MIST:

$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.63837	0.00256	1028.83718	<0.0001
B	0.99656	5.86752E-5	16984.34896	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj. R-Square	Root-MSE (SD)	N
0.99999	0.99999	0.99999	0.06351	3588

Parameter	LCI	UCI
A	2.63334	2.64339
B	0.99645	0.99668

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model	1	1.16366E6	1.16366E6	2.88468E8
Error	3586	14.46569	0.00403	
Total	3587	1.16368E6		

Prob>F

<0.0001

[10/6/2004 15:47 "/Graph4" (2453166)]

Linear Regression for #108 T\_C:

$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.31318	0.00388	596.47861	<0.0001
B	1.00122	7.18246E	13939.75942	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj. R-Square	Root-MSE (SD)	N
0.99999	0.99998	0.99998	0.11366	4489

Parameter	LCI	UCI
A	2.30558	2.32078
B	1.00108	1.00136

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model	1	2.51013E6	2.51013E6	1.94317E8
Error	4487	57.96181	0.01292	
Total	4488	2.51019E6		

Prob>F

<0.0001

[10/6/2004 15:50 "/Graph5" (2453166)]

Linear Regression for #109 T\_RT:

$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.53078	0.00253	1001.8217	<0.0001
B	0.99587	4.6706E-5	21322.16406	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj. R-Square	Root-MSE (SD)	N
1	0.99999	0.99999	0.07431	4489

Parameter	LCI	UCI
A	2.52583	2.53574
B	0.99578	0.99597

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model	1	2.51016E6	2.51016E6	4.54635E8
Error	4487	24.77397	0.00552	
Total	4488	2.51019E6		

Prob>F

<0.0001

[10/6/2004 16:00 "/#110 T\_MAINS/Graph6" (2453166)]

Linear Regression for #110 T\_MAINS:

$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.57567	0.00361	713.32848	<0.0001
B	0.99511	1.37995E-4	7211.23147	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj. R-Square	Root-MSE (SD)	N
0.99998	0.99997	0.99997	0.0569	1788

Parameter	LCI	UCI
A	2.56859	2.58275
B	0.99484	0.99538

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model	1	168382.88354	168382.88354	5.20019E7
Error	1786	5.7831	0.00324	
Total	1787	168388.66664		

Prob>F

<0.0001

[10/6/2004 16:03 "/Graph7" (2453166)]

Linear Regression for #112 T\_COLD:

$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.65558	0.00288	922.74317	<0.0001
B	0.99606	1.10406E-4	9021.82801	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj. R-Square	Root-MSE (SD)	N
0.99999	0.99998	0.99998	0.04548	1788

Parameter	LCI	UCI
A	2.64993	2.66122
B	0.99585	0.99628

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model	1	168384.9718	168384.9718	8.13934E7
Error	1786	3.69484	0.00207	
Total	1787	168388.66664		

Prob>F

<0.0001

[10/6/2004 16:06 "/Graph8" (2453166)]

Linear Regression for #113 T\_COLL\_R:

$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.52631	0.00196	1286.04194	<0.0001
B	0.99774	3.63847E-5	27421.85831	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj. R-Square	Root-MSE (SD)	N
1	0.99999	0.99999	0.05778	4489

Parameter	LCI	UCI
A	2.52246	2.53016
B	0.99766	0.99781

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model	1	2.51017E6	2.51017E6	7.51958E8
Error	4487	14.97843	0.00334	
Total	4488	2.51019E6		

Prob>F

<0.0001

[10/6/2004 16:09 "/Graph9" (2453166)]

Linear Regression for #116 T\_HOT:

$Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.72897	0.00277	984.0803	<0.0001
B	0.99881	5.15933E-5	19359.29045	<0.0001

R	R-Square (COD)	Adj. R-Square	Root-MSE (SD)	N
0.99999	0.99999	0.99999	0.08184	4489

Parameter	LCI	UCI
A	2.72354	2.73441
B	0.99871	0.99891

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic
Model 1		2.51016E6	2.51016E6	3.74782E8
Error	4487	30.05235	0.0067	
Total	4488	2.51019E6		

Prob>F

<0.0001