

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Pedro Marcondes Montaleone**

**Estratégia Inteligente de  
Aquecimento por Energia Solar**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro

Dezembro de 2014



**Pedro Marcondes Montaleone**

**Estratégia Inteligente de  
Aquecimento por Energia Solar**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Sergio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Epifanio Mamani Ticona**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Gisele Maria Ribeiro Vieira**

CEFET-RJ

**Prof. Mauricio Nogueira Frota**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de dezembro de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Pedro Marcondes Montaleone**

Graduou-se em Engenharia de Produção pela PUC-Rio em Dezembro de 2007. Trabalhou por mais de três anos no ramo de energia e atualmente trabalha no ramo de Engenharia Civil.

#### Ficha Catalográfica

Montaleone, Pedro Marcondes

Estratégia inteligente de aquecimento por energia solar / Pedro Marcondes Montaleone; orientador: Sergio Leal Braga. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

80 f.: il. (color.); 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Sistemas de aquecimento solar de água. 3. Múltiplos tanques de armazenamento térmico. 4. Aquecimento de água. 5. Energia solar. I. Braga, Sergio Leal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

Em memória de meu avô João e de meus antepassados que não tiveram a oportunidade de estudar. Agradeço especialmente à minha avó Carmellita, sem ela não teria a chance de ser aluno da PUC-Rio.

## Agradecimentos

Ao meu grande amigo Eng. Rodolfo Medeiros, pelas aulas de equação diferencial.

À minha amiga Prof<sup>a</sup>. Me. Aline Moura, pelas horas e horas de apoio, ombro amigo, leituras e correções.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Leal Braga, pela grande compreensão e paciência que teve comigo.

## Resumo

Montaleone, Pedro Marcondes; Braga, Sergio Leal. **Estratégia Inteligente de Aquecimento por Energia Solar**. Rio de Janeiro, 2014. 80p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação analisa aspectos da utilização da energia solar para aquecimento de água. Dois são os aspectos abordados: O primeiro é quanto à utilização de valores médios mensais ou diários de temperatura e insolação utilizados por diversos métodos de dimensionamento ou simulação de sistemas de aquecimento solar, e o segundo é a utilização de múltiplos tanques de armazenamento de água quente ao invés de um único reservatório de maior volume. Assim, este estudo tem como objetivo formular, simular e analisar diferentes cenários de configurações de sistemas de aquecimento solar de água, variando-se o número de reservatórios térmicos para um mesmo volume total do sistema. Tem-se por finalidade atender um mesmo padrão de consumo de água quente, condicionado a um mesmo perfil climático, visando otimizar a contribuição da energia solar ao sistema e conseqüentemente minimizar o consumo de energia auxiliar elétrica.

## Palavras-chave

Sistemas de aquecimento solar de água; Múltiplos tanques de armazenamento térmico; Aquecimento de água, Energia solar.

## Abstract

Montaleone, Pedro Marcondes; Braga, Sergio Leal (Advisor). **Intelligent Strategy for Water Heating by Solar Energy**. Rio de Janeiro, 2014. 80p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation examines aspects of the use of solar energy for water heating. Two aspects are handled: The first is regarding the use of average monthly or daily values of temperature and insolation used by different scaling methods or simulation of solar water heating systems, and the second is the use of multiple hot water storage tanks instead of a single larger volume reservoir of water. Thus, this study aims to formulate, simulate and analyze different configurations of solar water heating systems scenarios, varying the number of thermal reservoirs for the same total volume of the system. It intends to satisfy the same standard of hot water consumption, under same climatic conditions to optimize the contribution of solar energy to the system and consequently minimize the consumption of electric auxiliary energy

## Keywords

Solar water heating system; Multi-tank thermal storage; Water heating; Solar energy.

## Sumário

1. Introdução.....	16
2. Objetivos.....	16
3. Análise dos Dados Climáticos .....	18
4. Dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar .....	30
5. Modelagem do Simulador .....	36
5.1. Insolação no Plano Inclinado.....	36
5.2. Coletor Solar Plano .....	39
5.3. Reservatório de Água Quente .....	43
5.4. Tubulações .....	47
5.5. Consumo de Água Quente .....	47
5.6. Casos Simulados.....	48
6. Validação do Algoritmo .....	53
7. Análise da Utilização de Múltiplos Tanques.....	55
7.1. Perdas Térmicas para o Meio.....	55
7.2. Ganhos na Captação de Energia Solar .....	58
8. Resultados da Simulação .....	64
9. Conclusões e Sugestões .....	76
10. Referências bibliográficas.....	78

## Lista de figuras

Figura 3-1 Temperatura, Radiação Extraterrestre, Radiação Direta e Difusa médias de Janeiro, Fevereiro e Março.....	19
Figura 3-2 Temperatura, Radiação Extraterrestre, Radiação Direta e Difusa médias de Abril, Maio e Junho.....	19
Figura 3-3 Temperatura, Radiação Extraterrestre, Radiação Direta e Difusa médias de Julho, Agosto e Setembro.....	20
Figura 3-4 Temperatura, Radiação Extraterrestre, Radiação Direta e Difusa médias de Outubro, Novembro e Dezembro.....	20
Figura 3-5 Radiação Extraterrestre - Janeiro.....	21
Figura 3-6 Radiação Direta Terrestre - Janeiro.....	21
Figura 3-7 Radiação Difusa Terrestre - Janeiro.....	21
Figura 3-8 Temperatura Ambiente - Janeiro.....	21
Figura 3-9 Radiação Extraterrestre - Fevereiro.....	21
Figura 3-10 Radiação Direta Terrestre - Fevereiro.....	21
Figura 3-11 Radiação Difusa Terrestre - Fevereiro.....	21
Figura 3-12 Temperatura Ambiente - Fevereiro.....	21
Figura 3-13 Radiação Extraterrestre - Março.....	22
Figura 3-14 Radiação Direta Terrestre - Março.....	22
Figura 3-15 Radiação Difusa Terrestre - Março.....	22
Figura 3-16 Temperatura Ambiente - Março.....	22
Figura 3-17 Radiação Extraterrestre - Abril.....	22
Figura 3-18 Radiação Direta Terrestre - Abril.....	22
Figura 3-19 Radiação Difusa Terrestre - Abril.....	22
Figura 3-20 Temperatura Ambiente - Abril.....	22
Figura 3-21 Radiação Extraterrestre - Maio.....	23
Figura 3-22 Radiação Direta Terrestre - Maio.....	23
Figura 3-23 Radiação Difusa Terrestre - Maio.....	23
Figura 3-24 Temperatura Ambiente - Maio.....	23
Figura 3-25 Radiação Extraterrestre - Junho.....	23
Figura 3-26 Radiação Direta Terrestre - Junho.....	23
Figura 3-27 Radiação Difusa Terrestre - Junho.....	23
Figura 3-28 Temperatura - Junho.....	23
Figura 3-29 Radiação Extraterrestre - Julho.....	24
Figura 3-30 Radiação Direta Terrestre - Julho.....	24
Figura 3-31 Radiação Difusa Terrestre - Julho.....	24
Figura 3-32 Temperatura Ambiente - Julho.....	24
Figura 3-33 Radiação Extraterrestre - Agosto.....	24
Figura 3-34 Radiação Direta Terrestre - Agosto.....	24
Figura 3-35 Radiação Difusa Terrestre - Agosto.....	24
Figura 3-36 Temperatura Ambiente - Agosto.....	24
Figura 3-37 Radiação Extraterrestre - Setembro.....	25
Figura 3-38 Radiação Direta Terrestre - Setembro.....	25
Figura 3-39 Radiação Difusa Terrestre - Setembro.....	25
Figura 3-40 Temperatura Ambiente - Setembro.....	25

Figura 3-41 Radiação Extraterrestre - Outubro .....	25
Figura 3-42 Radiação Direta Terrestre - Outubro.....	25
Figura 3-43 Radiação Difusa Terrestre - Outubro .....	25
Figura 3-44 Temperatura Ambiente - Outubro .....	25
Figura 3-45 Radiação Extraterrestre - Novembro.....	26
Figura 3-46 Radiação Direta Terrestre - Novembro .....	26
Figura 3-47 Radiação Difusa Terrestre - Novembro.....	26
Figura 3-48 Temperatura Ambiente - Novembro.....	26
Figura 3-49 Radiação Extraterrestre - Dezembro.....	26
Figura 3-50 Radiação Direta Terrestre - Dezembro .....	26
Figura 3-51 Radiação Difusa Terrestre - Dezembro.....	26
Figura 3-52 Temperatura Ambiente - Dezembro.....	26
Figura 5.3-1 Resumo Esquemático – S.A.S. com 3 tanques.....	47
Figura 7.1-1 Energia armazenada em 16 horas - Cenário 01.....	56
Figura 7.1-2 Energia armazenada em 16 horas - Cenário 02.....	56
Figura 7.1-3 Energia armazenada em 16 horas - Cenário 03.....	56
Figura 7.2-1 Ordem dos procedimentos das Prioridades 03 e 04.....	59
Figura 7.2-2 Cenário 02 - Caso Base - Insolação +20% - Aquecimento sem consumo .....	61
Figura 7.2-3 Cenário 02 - Caso Base - Insolação Normal - Aquecimento sem consumo .....	61
Figura 7.2-4 Cenário 02 - Caso Base - Insolação -20% - Aquecimento sem consumo .....	61
Figura 7.2-5 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação +20% - Prioridade 01 .....	62
Figura 7.2-6 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação Normal - Prioridade 01 .....	62
Figura 7.2-7 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação -20% - Prioridade 01 .....	62
Figura 7.2-8 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação +20% - Prioridade 02 .....	62
Figura 7.2-9 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação Normal - Prioridade 02 .....	62
Figura 7.2-10 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação -20% - Prioridade 02 .....	62
Figura 7.2-11 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação +20% - Prioridade 03 .....	63
Figura 7.2-12 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação Normal - Prioridade 03 .....	63
Figura 7.2-13 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação -20% - Prioridade 03 .....	63
Figura 7.2-14 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação +20% - Prioridade 04 .....	63
Figura 7.2-15 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação Normal - Prioridade 04 .....	63
Figura 7.2-16 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação -20% - Prioridade 04 .....	63
Figura 8-1 Perdas por Consumo e por Transferência para o Meio - Cenário 01 - 300 L .....	70
Figura 8-2 Fornecimento de Energia Solar e Elétrica com Custo Mensal de Energia Elétrica - Cenário 01 - 300 L.....	71
Figura 8-3 Perdas por Consumo e por Transferência para o Meio - Cenário 02 - 600 L .....	72
Figura 8-4 Fornecimento de Energia Solar e Elétrica com Custo Mensal de Energia Elétrica - Cenário 02 - 600 L.....	73
Figura 8-5 Perdas por Consumo e por Transferência para o Meio - Cenário 03 - 1.000 L.....	74
Figura 8-6 Fornecimento de Energia Solar e Elétrica com Custo Mensal de Energia Elétrica - Cenário 03 - 1.000 L.....	75

## Lista de tabelas

Tabela 3-1 Análise Qualitativa do Dados Climáticos .....	28
Tabela 5.2-1 Temperatura Máxima para Equação Linear.....	40
Tabela 5.2-2 Temperatura Máxima para Equação Não Linear.....	41
Tabela 5.6-1 Resumo dos Casos Estudados - Cenário 01 .....	49
<i>Tabela 5.6-2 Resumo dos Casos Estudados – Cenário 02 .....</i>	<i>50</i>
Tabela 5.6-3 Resumo dos Casos Estudados – Cenário 03.....	51
Tabela 5.6-6 Resumo dos Casos Especiais.....	52
Tabela 6-1 Perda Específica de Energia Mensal – Inmetro e Algoritmo .....	53
Tabela 6-2 Fração Solar – F-Chart e Algoritmo .....	54
Tabela 7.1-1 Temperatura Média Final em 16 Horas.....	55
Tabela 7.2-1 Energia Total Acumulada pelo Sistema - Cenário 02 - Caso 04.....	60
Tabela 8-1 Resultados das Simulações - Cenário 01.....	65
Tabela 8-2 Resultados das Simulações - Cenário 02.....	66
Tabela 8-3 Resultados das Simulações - Cenário 02 - Casos Especiais.....	67
Tabela 8-4 Resultados das Simulações - Cenário 03.....	68
Tabela 8-5 Resultados das Simulações - Cenário 03 - Aquecedor de Passagem e Casos Especiais.....	69

## Lista de símbolos

### Símbolos

$A_c$	Área do coletor	(m <sup>2</sup> )
$A_{t, \text{fluido}}$	Área transversal do fluido	(m <sup>2</sup> )
$A_{t, \text{parede}}$	Área transversal da parede interna metálica	(m <sup>2</sup> )
$C_p$	Calor específico da água	(W·s/kg·K)
$DE_{\text{mês}}$	Demanda energética mensal	(kWh/mês)
$EA_{\text{mês}}$	Energia solar mensal absorvida pelos coletores	(kWh/mês)
$e_{L, \text{isol}}$	Espessura lateral do revestimento isolante térmico	(m)
$e_{L, \text{met}}$	Espessura da chapa metálica na lateral do tanque	(m)
$e_{T, \text{isol}}$	Espessura do revestimento isolante na tampa do tanque	(m)
$e_{T, \text{met}}$	Espessura da chapa metálica na tampa do tanque	(m)
$EP_{\text{mês}}$	Energia mensal perdida pelos coletores	(kWh/mês);
$f$	fração solar	(-)
$F$	Fração solar anual	(-)
$F_R(\tau\alpha)_n$	Fator de eficiência óptica do coletor	(-)
$F_R U_L$	Coefficiente global de perdas do coletor	(W/(m <sup>2</sup> ·K));
$\bar{H}$	Energia solar média mensal	(kWh/(m <sup>2</sup> ·mês))
$H$	Altura do tanque	(m)
$H$	Radiação solar diária incidente no plano inclinado	(kWh/(m <sup>2</sup> ·dia))
$h_{ar}$	Coefficiente de transferência de calor do ar	(W/m <sup>2</sup> ·K)
$I_b$	Radiação direta	(Wh/m <sup>2</sup> )
$I_d$	Radiação difusa	(Wh/m <sup>2</sup> )
$I_t$	Radiação no plano inclinado	(Wh/m <sup>2</sup> )
$K_1$	fator de correção para a proporção armazenamento por área de coletor	(-)
$K_2$	fator de correção para o S.A.S., relacionando as diferentes temperaturas	(-)
$k_{\text{água}}$	Condutividade térmica da água	(W/m·K)
$k_{\text{isol}}$	Condutividade térmica do isolante	(W/m·K)
$k_{\text{met}}$	Condutividade térmica do metal	(W/m·K)
$\dot{m}$	Vazão mássica da água através coletor	(kg/s)

$m_i$	Massa de água contida no nó $i$	(kg)
$n$	Número de nós	(-)
$n_{\text{dia}}$	Número de dias no mês	(dias/mês);
$n_{\text{Juliano}}$	Número de dias Juliano	(-)
$n_{\text{pessoas}}$	Número de pessoas que habitam a unidade de interesse	(-)
$Q_{\text{dia}}$	Consumo em litros de água quente por dia	(L/dia);
$r$	Raio do tanque	(m)
$R_b$	Razão entre plano inclinado e plano horizontal	(-)
$T_{a.f.}$	Temperatura da água fria	(°C)
$T_{\text{amb}}$	Temperatura ambiente média mensal	(°C)
$T_{\text{arm.}}$	Temperatura de armazenamento da água quente	(°C)
$t_{\text{banho}}$	Tempo de duração do banho	(min)
$T_{\text{cons.}}$	Temperatura de consumo da água quente	(°C)
$T_e$	Temperatura da água na entrada do coletor	(°C)
$T_s$	Temperatura da água na saída do coletor	(°C)
$T_{b/t, t+1}$	Temperatura no nó da base ou do topo na iteração $t+1$	(°C)
$T_{\text{amb},t}$	Temperatura ambiente no instante $t$	(°C)
$T_{i,t+1}$	Temperatura no nó $i$ na iteração $t+1$	(°C)
$T_{i,t}$	Temperatura do nó $i$ no instante $t$	(°C)
$T_{i+1,t}$	Temperatura do nó posterior no instante $t$	(°C)
$T_{i-1,t}$	Temperatura do nó anterior no instante $t$	(°C)
$UA_{b/t}$	Coeficiente de troca de calor pela base ou topo do tanque	(W/K)
$UA_{\text{lateral}}$	Coeficiente de troca de calor pela lateral do tanque	(W/K)
$UE_{\text{mês}}$	Energia útil mensal coletada	(kWh/mês)
$V$	Volume do tanque de água quente	(L)
$\dot{v}_{\text{consumo}}$	Vazão de consumo de água quente	(L/min)

## Letras Gregas

$\beta$	Inclinação do plano do coletor em relação ao plano horizontal	(graus)
$\delta$	Declinação solar	(graus)
$\Delta T$	Horas por mês	(h/mês)
$\Delta t$	Tempo decorrido em cada iteração	(s)
$\eta$	Eficiência do coletor	(-)
$\varnothing$	Latitude do local de instalação do S.A.S	(graus)
$\omega$	Ângulo horário	(graus)

Vigie seus pensamentos, pois se tornarão palavras;  
Vigie suas palavras, pois se tornarão atos;  
Vigie seus atos, pois se tornarão hábitos;  
Vigie seus hábitos, pois formarão o seu caráter;  
Vigie seu caráter, pois se tornará seu destino.

Teócrito – 310 - 250 AC

## 1. Introdução

A diversificação das fontes da matriz energética é cada vez mais necessária, seja para poupar recursos não renováveis como o petróleo, que tem se tornado mais escasso, seja para reduzir a vulnerabilidade da matriz, ou ainda para mitigar os impactos ambientais decorrentes da utilização de fontes não renováveis. É neste cenário que as energias renováveis, tais como as fontes hídrica, eólica, biomassa ou solar, apresentam papel de relevância crescente.

Este estudo analisa aspectos da utilização da energia solar para aquecimento de água de consumo residencial. Vale ressaltar que o aprendizado desenvolvido poderá também ser utilizado para o aquecimento de outros fluidos para fins comerciais e industriais. Dois são os aspectos abordados: O primeiro é quanto à utilização de valores médios mensais ou diários de temperatura e insolação utilizados por diversos métodos de dimensionamento ou simulação de sistemas de aquecimento solar (S.A.S.), e o segundo é a utilização de múltiplos tanques de armazenamento de água quente ao invés de um único reservatório de maior volume.

A utilização de dados médios mensais ou diários mascara as mudanças do tempo. Os S.A.S. são então projetados para operar em condições climáticas medianas, desconsiderando situações como uma entrada de frente fria, uma chuva no meio do dia, uma manhã nublada, etc. Nessas condições o S.A.S. opera com menor eficiência e faz-se necessário o uso do sistema de aquecimento de apoio.

A utilização de um único reservatório de água quente apresenta vantagens na simplificação do projeto e da manutenção, entretanto, em dias nublados ou no começo da manhã, quando ainda não há insolação significativa no coletor solar, o sistema de aquecimento de apoio terá de atuar para aquecer todo o volume do reservatório. Nessa condição climática, caso haja múltiplos tanques de menor volume, o sistema de apoio atuaria inicialmente apenas em um dos tanques, garantindo o fornecimento de água quente, mas postergando o aquecimento do volume restante de água. Essa postergação pode ser o tempo suficiente para que as condições de insolação melhorem e permitam o aquecimento d'água pelos painéis coletores.

## 2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo formular, simular e analisar diferentes cenários de configurações de sistemas de aquecimento solar de água, para atender um mesmo padrão de consumo de água quente, condicionado a um mesmo perfil climático, visando otimizar a contribuição da energia solar ao sistema e conseqüentemente minimizar o consumo de energia auxiliar elétrica.

São considerados os seguintes cenários para comparação: Aquecimento por boiler, sistema de aquecimento solar com tanque único com aquecedor auxiliar elétrico interno, sistema de aquecimento solar com múltiplos tanques com aquecedor auxiliar elétrico interno, sistema de aquecimento solar com tanque único com aquecedor auxiliar elétrico externo (aquecedor de passagem), e sistema de aquecimento solar com múltiplos tanques com aquecedor auxiliar elétrico externo.

Quanto à utilização de múltiplos tanques, são avaliados os aumentos de perda de energia térmica para o meio ambiente em função do aumento da área de troca de calor. Avalia-se também os aumentos de eficiência do coletor solar por conta da maior estratificação da temperatura d'água. Procura-se então uma condição de operação capaz de assegurar que os ganhos de eficiência do coletor solar superem as perdas térmicas, para que o consumo de energia elétrica seja minimizado no sistema.

### 3. Análise dos Dados Climáticos

Dados climáticos, mais especificamente os dados solarimétricos, são facilmente encontrados na internet. As publicações têm o intuito de difundir e facilitar projetos utilizando energia solar. Em âmbito nacional, é possível encontrar o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), iniciado em 2001 sob a coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente (DMA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), desenvolvido pelo projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e co-financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF). Outro material de consulta disponível é o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), financiado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás (CEPEL), desenvolvido em parceria pelo CEPEL, Universidade Federal de Pernambuco e Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF).

Existem ainda estudos de âmbito estadual como o Levantamento do Potencial de Energia Solar Paulista (2013) desenvolvido por uma parceria da Secretaria de Energia do Estado de São Paulo e o INPE. Outra fonte é o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais (2011), desenvolvido pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) juntamente com o Governo do Estado de Minas Gerais e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Os trabalhos acima citados, entretanto, apresentam valores solarimétricos médios diários ou mensais. Embora existam fórmulas para converter esses dados para base horária, o presente estudo pretende demonstrar que a variação de insolação a cada dia do ano é expressiva, e que valores médios são insuficientes para uma simulação precisa de um S.A.S..

Utilizou-se então dados publicados pela National Renewable Energy Laboratory (NREL), que é o principal laboratório de pesquisa e desenvolvimento de eficiência energética e energias renováveis do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, estudo financiado pelo PNUMA, intitulado Hourly Solar Data for Selected Stations in Brazil (2005). Os dados de entrada do modelo NREL METSAT foram obtidos pelo cruzamento de informações fornecidas por satélites e observações de cobertura de nuvens.

Foram então utilizados os valores horários de radiação extraterrestre normal ao plano horizontal, radiação direta terrestre normal ao plano horizontal, radiação difusa terrestre normal ao plano horizontal (todas em  $\text{Wh}/\text{m}^2$ ) e temperatura de bulbo seco (em  $^{\circ}\text{C}$ ), fornecidos pelo NREL, contendo os anos de 1997 a 2001, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

Para as análises dos dados, primeiramente foi calculado o dia médio de cada mês para o período de 5 anos, gerando os gráficos abaixo.

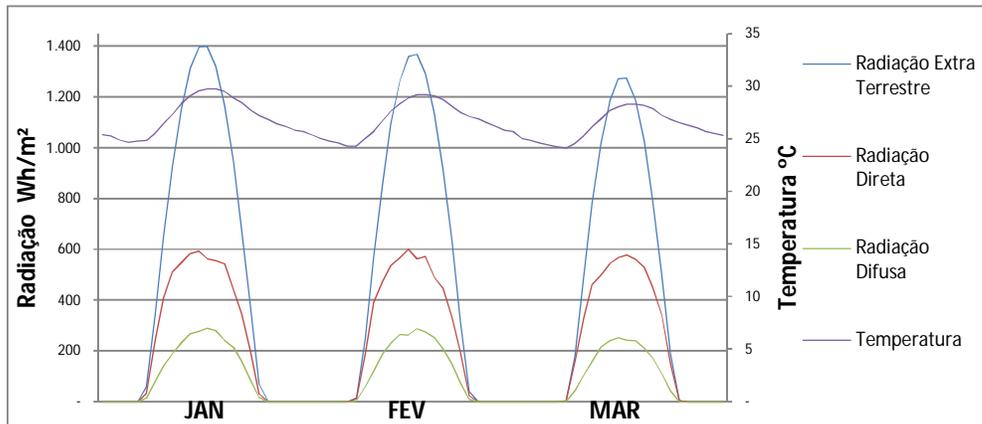


Figura 3-1 Temperatura, Radiação Extraterrestre, Radiação Direta e Difusa médias de Janeiro, Fevereiro e Março.

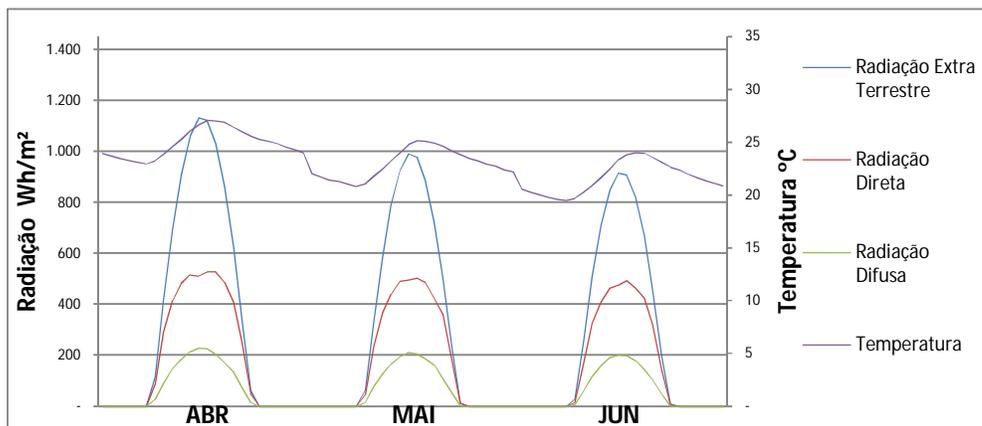


Figura 3-2 Temperatura, Radiação Extraterrestre, Radiação Direta e Difusa médias de Abril, Maio e Junho.

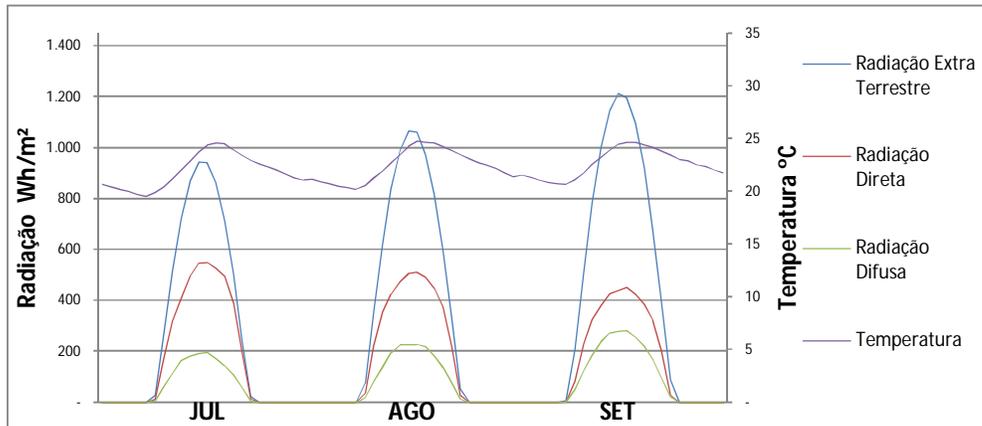


Figura 3-3 Temperatura, Radiação Extraterrestre, Radiação Direta e Difusa médias de Julho, Agosto e Setembro.

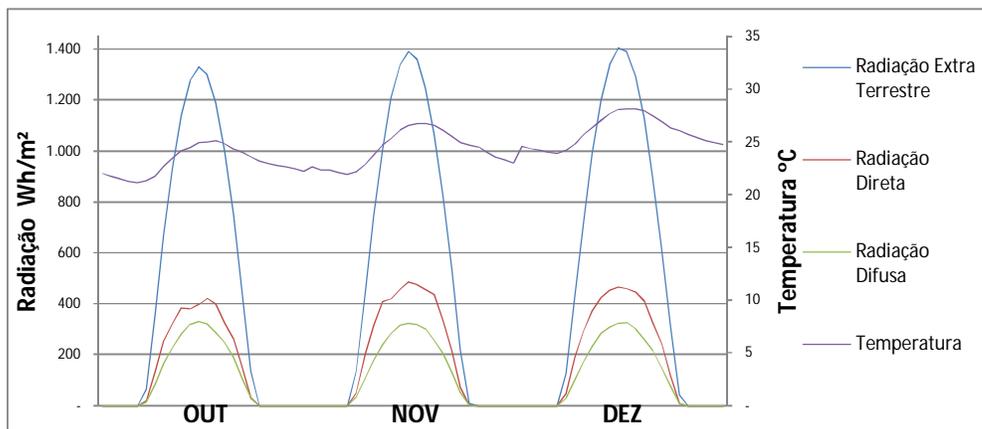


Figura 3-4 Temperatura, Radiação Extraterrestre, Radiação Direta e Difusa médias de Outubro, Novembro e Dezembro.

Observa-se maior radiação nos meses de verão e menor radiação durante o inverno, como era de se esperar. Vê-se também que a radiação extraterrestre é bem maior que a radiação no nível do solo, já que parte da radiação solar é refletida ou absorvida pela atmosfera.

Prosseguindo nos estudos dos dados climáticos, a fim de analisar a sua dispersão, foram feitos gráficos do tipo Box-plot que mostram a média, 25% dos dados abaixo da média (primeiro quartil – Q1), 25% dos dados acima da média (terceiro quartil – Q3) e os valores máximos e mínimos dos dias de cada mês dos 5 anos analisados. Ou seja, o gráfico de janeiro contém os valores dos dias de janeiro dos anos 1997 a 2001. E assim, sucessivamente para os demais meses e demais gráficos.

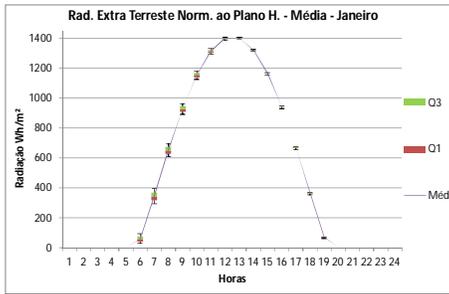


Figura 3-5 Radiação Extraterrestre - Janeiro

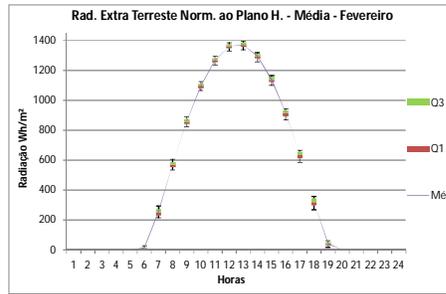


Figura 3-9 Radiação Extraterrestre - Fevereiro

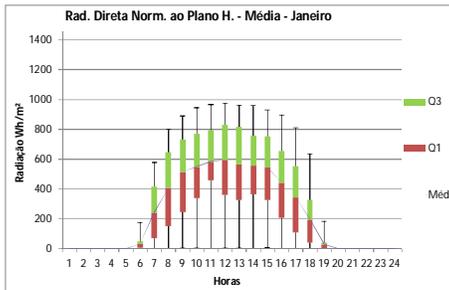


Figura 3-6 Radiação Direta Terrestre - Janeiro

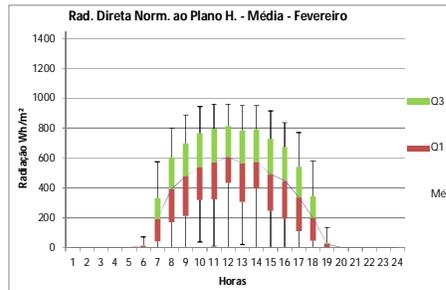


Figura 3-10 Radiação Direta Terrestre - Fevereiro

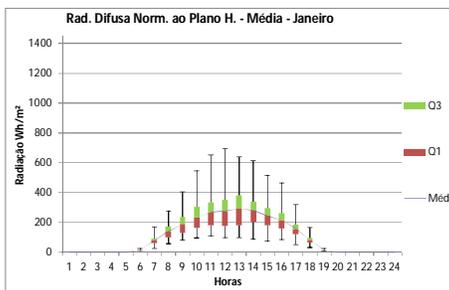


Figura 3-7 Radiação Difusa Terrestre - Janeiro

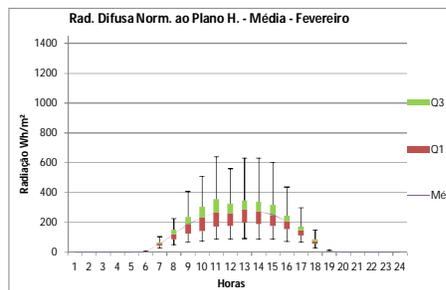


Figura 3-11 Radiação Difusa Terrestre - Fevereiro

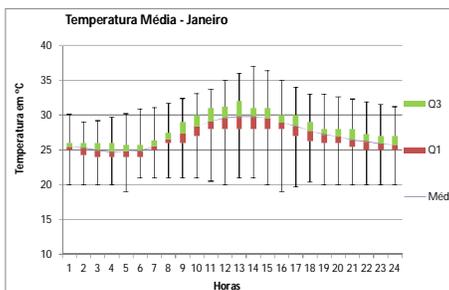


Figura 3-8 Temperatura Ambiente - Janeiro

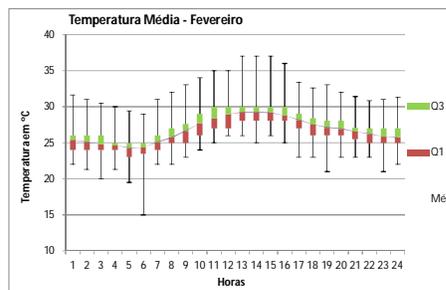


Figura 3-12 Temperatura Ambiente - Fevereiro

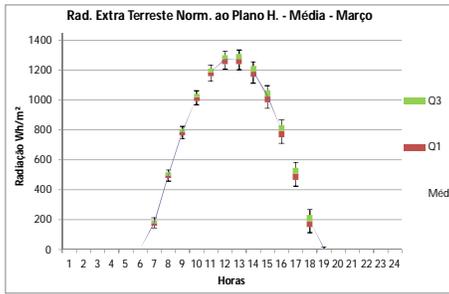


Figura 3-13 Radiação Extraterrestre - Março

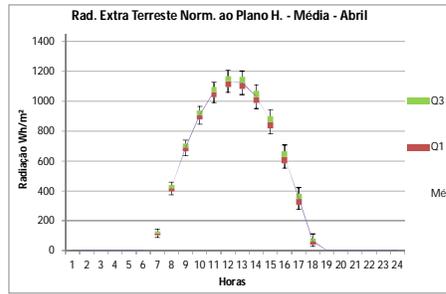


Figura 3-17 Radiação Extraterrestre - Abril

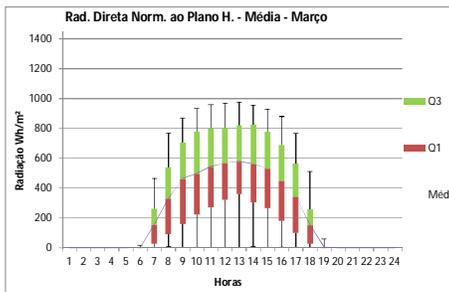


Figura 3-14 Radiação Direta Terrestre - Março

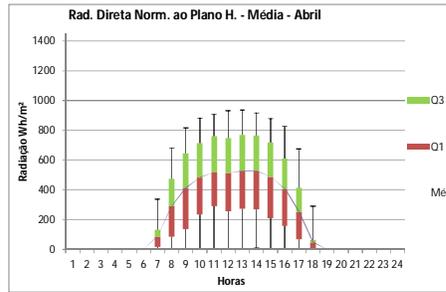


Figura 3-18 Radiação Direta Terrestre - Abril

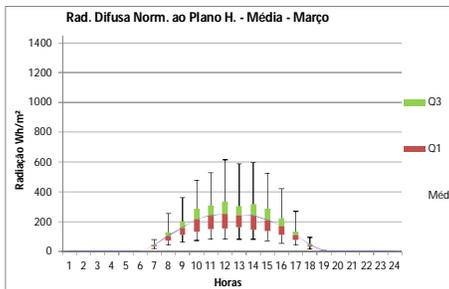


Figura 3-15 Radiação Difusa Terrestre - Março

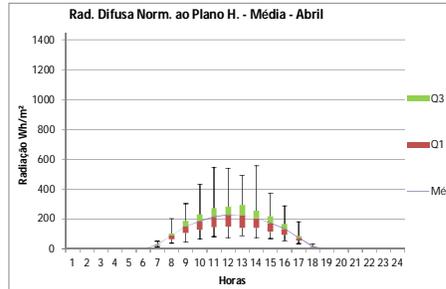


Figura 3-19 Radiação Difusa Terrestre - Abril

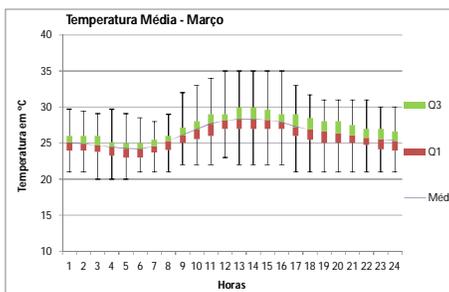


Figura 3-16 Temperatura Ambiente - Março

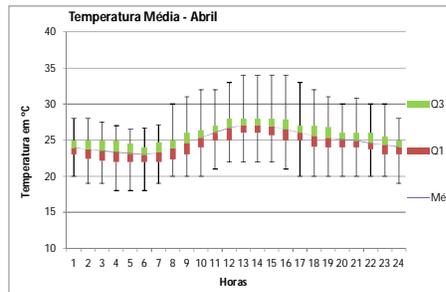


Figura 3-20 Temperatura Ambiente - Abril

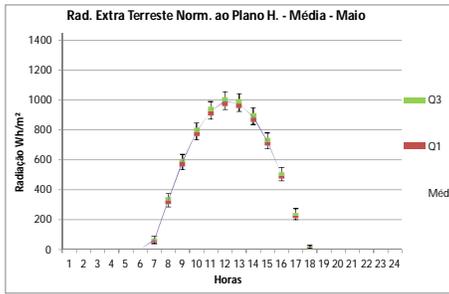


Figura 3-21 Radiação Extraterrestre - Maio

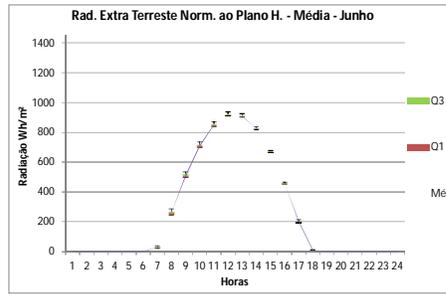


Figura 3-25 Radiação Extraterrestre - Junho

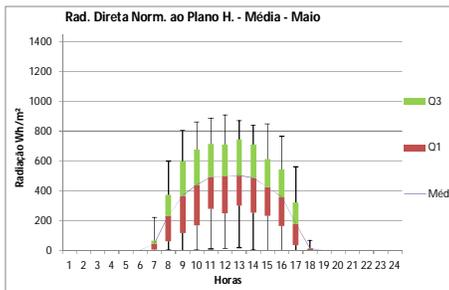


Figura 3-22 Radiação Direta Terrestre - Maio

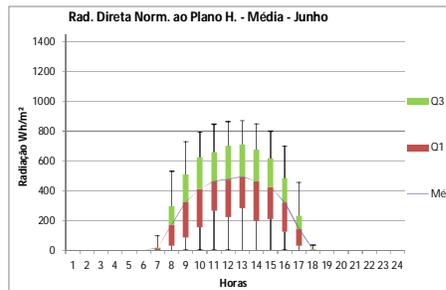


Figura 3-26 Radiação Direta Terrestre - Junho

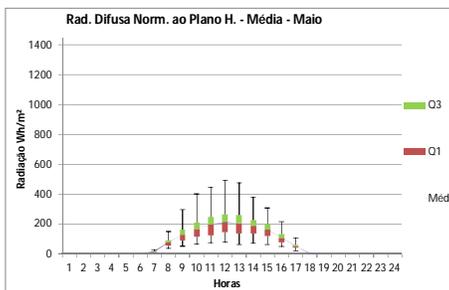


Figura 3-23 Radiação Difusa Terrestre - Maio

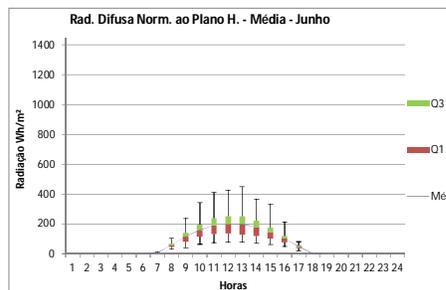


Figura 3-27 Radiação Difusa Terrestre - Junho

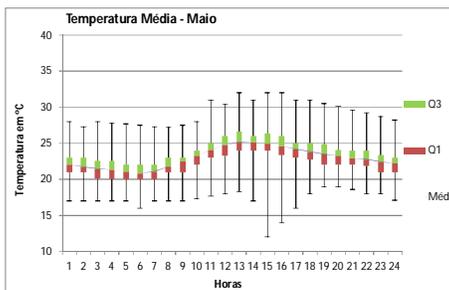


Figura 3-24 Temperatura Ambiente - Maio

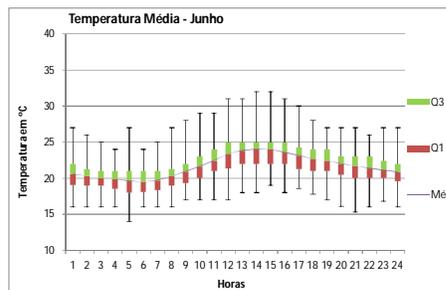


Figura 3-28 Temperatura - Junho

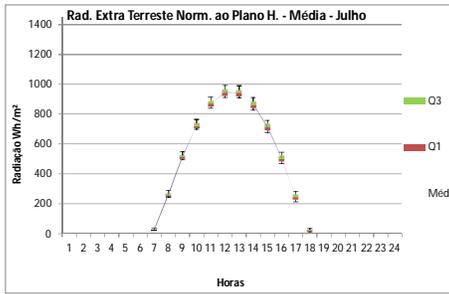


Figura 3-29 Radiação Extraterrestre - Julho

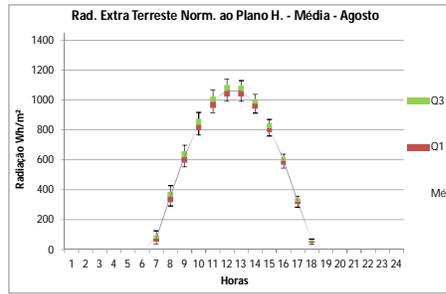


Figura 3-33 Radiação Extraterrestre - Agosto

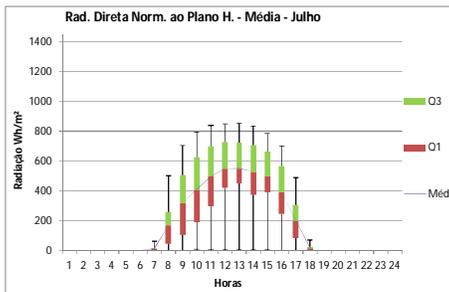


Figura 3-30 Radiação Direta Terrestre - Julho

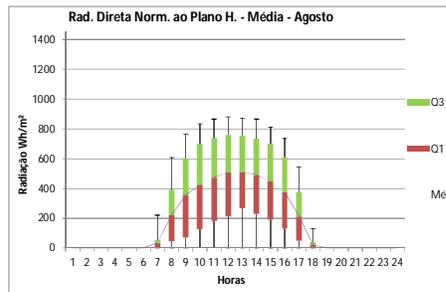


Figura 3-34 Radiação Direta Terrestre - Agosto

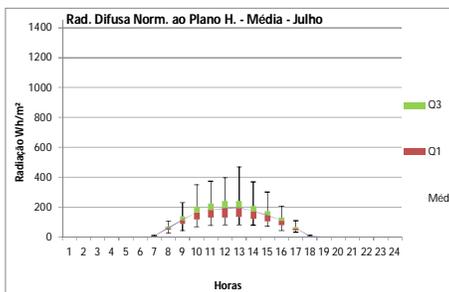


Figura 3-31 Radiação Difusa Terrestre - Julho

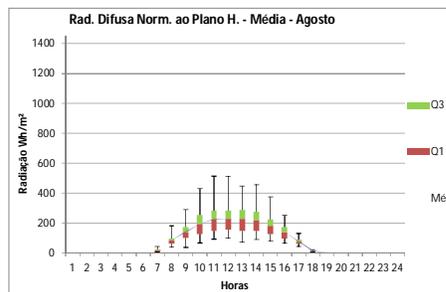


Figura 3-35 Radiação Difusa Terrestre - Agosto

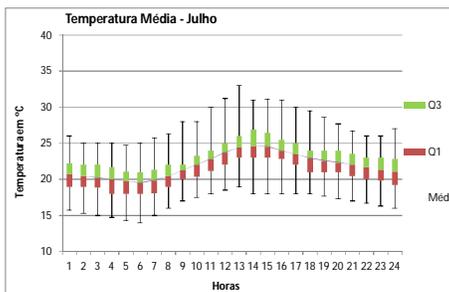


Figura 3-32 Temperatura Ambiente - Julho

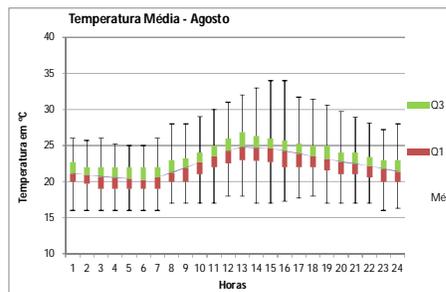


Figura 3-36 Temperatura Ambiente - Agosto

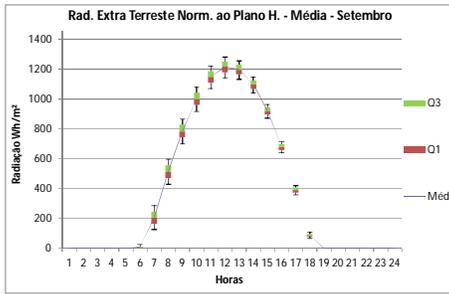


Figura 3-37 Radiação Extraterrestre - Setembro

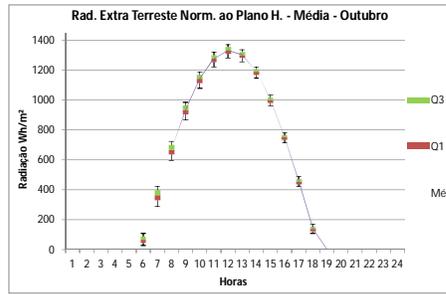


Figura 3-41 Radiação Extraterrestre - Outubro

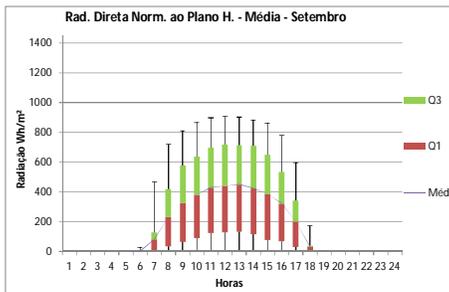


Figura 3-38 Radiação Direta Terrestre - Setembro

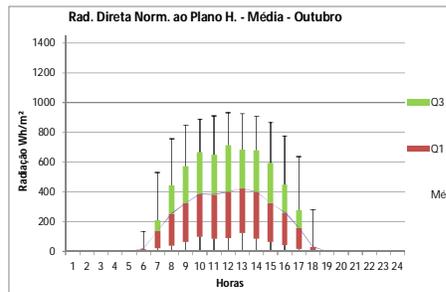


Figura 3-42 Radiação Direta Terrestre - Outubro

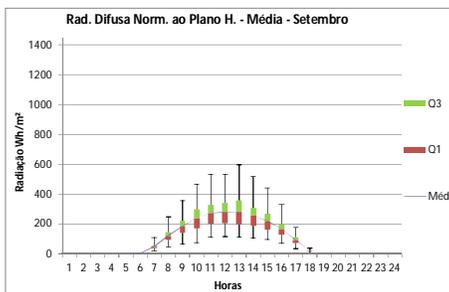


Figura 3-39 Radiação Difusa Terrestre - Setembro

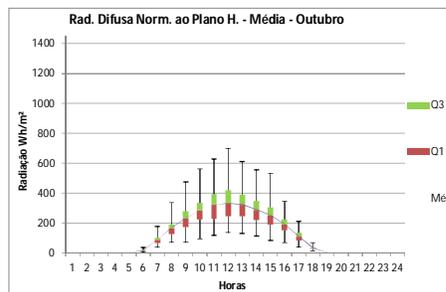


Figura 3-43 Radiação Difusa Terrestre - Outubro

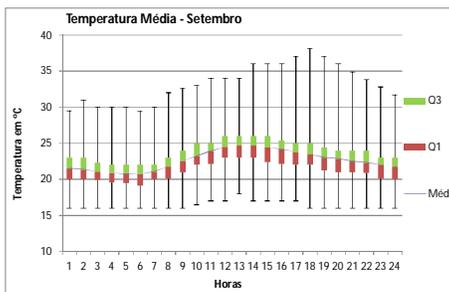


Figura 3-40 Temperatura Ambiente - Setembro

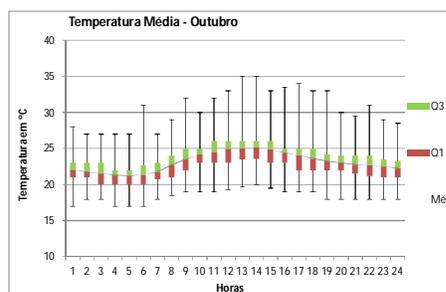


Figura 3-44 Temperatura Ambiente - Outubro

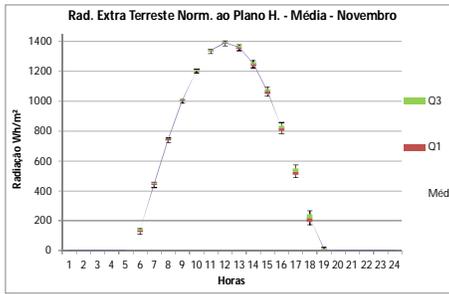


Figura 3-45 Radiação Extraterrestre - Novembro

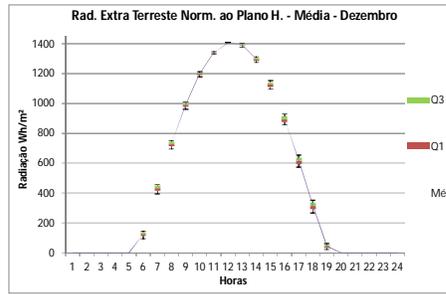


Figura 3-49 Radiação Extraterrestre - Dezembro

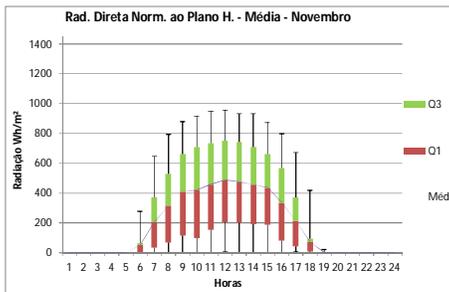


Figura 3-46 Radiação Direta Terrestre - Novembro

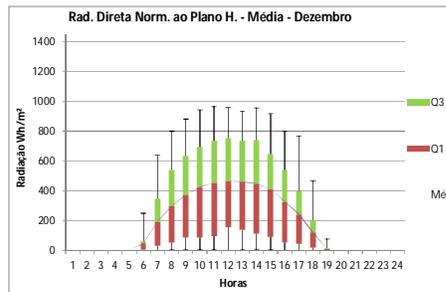


Figura 3-50 Radiação Direta Terrestre - Dezembro

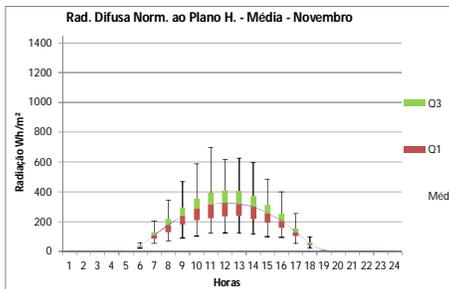


Figura 3-47 Radiação Difusa Terrestre - Novembro

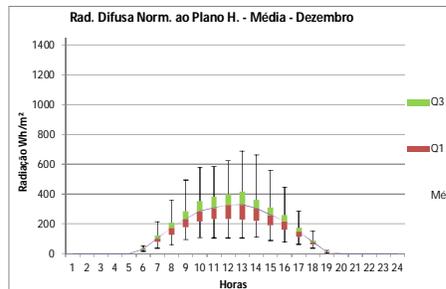


Figura 3-51 Radiação Difusa Terrestre - Dezembro

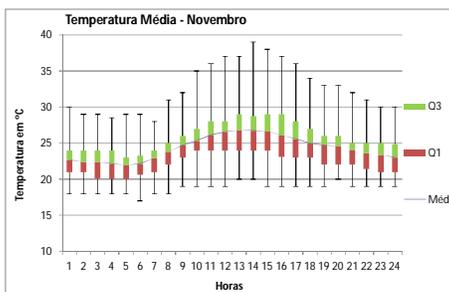


Figura 3-48 Temperatura Ambiente - Novembro

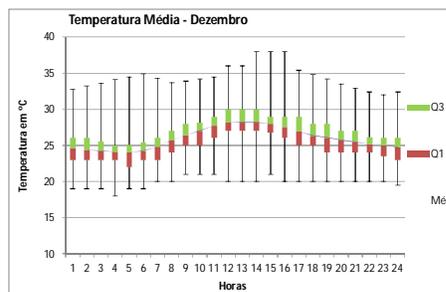


Figura 3-52 Temperatura Ambiente - Dezembro

Como esperado, há pouca variação nos valores extraterrestres de radiação solar para cada mês. Contudo, devido aos fenômenos climáticos como frentes frias, nevoeiro, chuva e etc., há uma grande variação nas radiações direta e difusa, e também na temperatura ambiente em todos os meses.

Fica assim demonstrada a grande variabilidade dos dados que compõem os valores médios. Se essa variabilidade fosse distribuída dentro de cada dia do ano, ou seja, uma manhã com pouca insolação compensada por uma tarde de boa insolação, ou uma insolação acima da média próximo ao meio-dia que compensasse eventual manhã e tarde de pouca insolação, então o dia médio seria uma boa aproximação para modelagem de um S.A.S.. Fez-se então necessário analisar como é o comportamento diário de cada curva de insolação.

Para esta próxima análise foram somados os valores de radiação direta e difusa de cada dia. Isso porque um determinado dia pode apresentar baixa insolação direta em função de uma alta insolação difusa, como em um dia de nevoeiro, compensando uma à outra. Ademais, dividiu-se o período de insolação em três partes – manhã, meio-dia e tarde – que receberam então três classificações – fraca, regular e boa. O período da manhã encerra os dados registrados entre 07 e 10 horas, o período nomeado “meio-dia” refere-se aos dados das 11 às 14 horas e a tarde os de 15 às 18 horas.

Calculou-se a insolação média de cada período (manhã, meio-dia e tarde) que foi então comparada com a insolação média de cada período do dia médio de seu mês. Ou seja, a manhã, meio-dia e tarde de um dia específico de janeiro é comparada com a manhã, meio-dia e tarde do dia médio de janeiro, e assim por diante para cada dia e mês. Se o período estiver 20% abaixo da média, é classificado como fraco, 20% acima é classificado como bom e entre -20% e +20% é classificado como regular. Cada classificação recebe um peso. Fraco tem peso -1, regular tem peso 0 e bom +1. Assim, um dia com manhã fraca, meio-dia fraco e tarde fraca recebe uma nota total de -3. Um dia com manhã boa, meio-dia bom e tarde boa, nota +3 e um dia dentro da média recebe nota zero. Outras combinações de períodos geram notas entre -3 e +3. Para cada nota foi dada a seguinte classificação: -3, dia péssimo; -2, dia muito fraco; -1, dia fraco; 0, dia regular; 1, dia bom; 2, dia muito bom e 3, dia ótimo. Os 1.826 dias foram então classificados e distribuídos na tabela a seguir:



Observa-se então grande distribuição dos dias entre as 7 classificações, confirmando a fragilidade de se utilizar dados diários ou mensais médios para simulações de um S.A.S., uma vez que mascaram situações como uma entrada de frente fria, uma chuva no meio do dia, uma manhã nublada, etc. Condições nas quais um S.A.S. opera com menor eficiência e faz-se necessária a utilização do sistema de aquecimento de apoio.

Sendo assim, o presente trabalho utiliza em suas simulações os dados horários informados pela NREL. Com exceção no próximo capítulo – Dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar – onde serão utilizados valores médios mensais, pois o método F-Chart (apresentado adiante) é baseado nesse tipo de inputs. Contudo, a metodologia F-Chart não descarta a variabilidade climática, considerando-a em suas fórmulas.

## 4. Dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar

Para dimensionamento de um sistema de aquecimento solar obedeceu-se a NBR 15569 – Sistema de aquecimento solar de água em circuito elétrico direto: Projeto e instalação (ABNT, 2008) e o Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética – Edificações residenciais – RTQ-R (Inmetro, 2010). A metodologia utilizada nestas publicações é a F-Chart (BECKMAN et al. 1977).

A metodologia F-Chart (Tabela-F, em tradução livre) consiste no cálculo das frações solares ( $f$ ) através de tabelas. A fração solar é a energia útil captada pelos coletores solares em relação à demanda energética total do sistema de aquecimento.

Em face de uma maior disponibilidade de mapas solarimétricos com valores médios diários ou mensais, em detrimento de dados horários, os desenvolvedores do modelo calcularam as correlações entre os dados climáticos médios e resultados obtidos em centenas de simulações e análises de campo de sistemas de aquecimento solar. Das correlações elaborou-se a fórmula para o cálculo de  $f$ .

A fração solar depende de duas variáveis adimensionais  $D_1$  e  $D_2$  que interpretam, respectivamente, os ganhos energéticos e as perdas térmicas do sistema solar. Os dois fatores levam em consideração as características térmicas específicas dos coletores, a radiação solar diária média mensal incidente no plano do coletor, a temperatura diária média mensal ambiente e a carga de aquecimento mensal. A correlação da fração solar  $f$  é dada pela equação:

$$f = 1,029 D_1 - 0,065 D_2 - 0,245 D_1^2 + 0,0018 D_2^2 + 0,0215 D_1^3 \quad (4.1)$$

Sendo  $D_1$ , que representa os ganhos energéticos, igual a:

$$D_1 = \frac{EA_{\text{mês}}}{DE_{\text{mês}}} \quad (4.2)$$

Onde:

$EA_{\text{mês}}$ : Energia solar mensal absorvida pelos coletores (kWh/mês);

$DE_{\text{mês}}$ : Demanda energética mensal (kWh/mês).

Sendo  $D_2$ , que representa as perdas térmicas, igual a:

$$D_2 = \frac{EP_{mês}}{DE_{mês}} \quad (4.3)$$

Onde:

$EP_{mês}$ : Energia mensal perdida pelos coletores (kWh/mês);

$DE_{mês}$ : Demanda energética mensal (kWh/mês).

$DE_{mês}$ , Demanda energética mensal, é dada por:

$$DE_{mês} = Q_{dia} \cdot n_{dia} \cdot (T_{cons.} - T_{a.f.}) \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} \quad (4.4)$$

Onde:

$Q_{dia}$ : Consumo em litros de água quente por dia à temperatura de consumo de água quente  $T_{cons.}$  (L/dia);

$N$ : Número de dias no mês (dias/mês);

$T_{cons.}$ : Temperatura de consumo da água quente (°C);

$T_{a.f.}$ : Temperatura da água fria (°C);

$1,16 \cdot 10^{-3}$ : é o fator de conversão  $C_p/3.600s/1.000$ , para transformar o resultado de Joules em kWh.

$Q_{dia}$  é dado por:

$$Q_{dia} = n_{pessoas} \cdot t_{banho} \cdot \dot{v}_{consumo} \quad (4.5)$$

Onde:

$n_{pessoas}$ : Número de pessoas que habitam a unidade de interesse;

$t_{banho}$ : tempo médio de duração do banho (min);

$\dot{v}_{consumo}$ : Vazão de consumo de água quente (L/min).

$EA_{mês}$ , Energia solar mensal absorvida pelos coletores, é dada por:

$$EA_{mês} = A_c \cdot F'_R(\tau\alpha) \cdot \bar{H} \quad (4.6)$$

Onde:

$A_c$ : Área do coletor (m<sup>2</sup>);

$F'_R(\tau\alpha)$ : Fator de ganho do coletor (adimensional);

$\bar{H}$ : Energia solar média mensal (kWh/(m<sup>2</sup>.mês)).

$F_R(\tau\alpha)$  é dado por:

$$F'_R(\tau\alpha) = F_R(\tau\alpha)_n \cdot \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \cdot \frac{F'_R}{F_R} \quad (4.7)$$

Onde:

$F_R(\tau\alpha)_n$ : Fator de eficiência óptica do coletor, obtido nas tabelas do Programa Brasileiro de Etiquetagem (Inmetro) (adimensional) (O índice n refere-se ao raio solar ser normal ao plano do coletor);

$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}$ : modificador do ângulo de incidência (na ausência desta informação recomenda-se adotar 0,96 para coletores com cobertura de vidro) (adimensional);

$\frac{F'_R}{F_R}$ : fator de correção do conjunto coletor/trocador (na ausência desta informação recomenda-se adotar 0,95) (adimensional).

$\bar{H}$ , Energia solar mensal, é dada por:

$$\bar{H} = H \cdot n \quad (4.8)$$

Onde:

$H$ : Radiação solar diária incidente no plano inclinado, obtido em cartas solarimétricas (kWh/(m<sup>2</sup>.dia));

$n$ : Número de dias no mês (dia/mês).

E para o cálculo de  $D_2$  é preciso também de  $EP_{\text{mês}}$ , Energia mensal perdida pelos coletores:

$$EP_{\text{mês}} = A_c \cdot F'_r U_L \cdot (100 - T_{\text{amb}}) \cdot \Delta T \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (4.9)$$

Onde:

$A_c$ : Área do coletor (m<sup>2</sup>);

$F'_r U_L$ : Fator de perda do coletor (kW/(m<sup>2</sup>.K));

$T_{\text{amb}}$ : Temperatura ambiente média mensal (°C);

$\Delta T$ : Horas por mês (h/mês)

$K_1$ : fator de correção para a proporção armazenamento por área de coletor (adimensional);

$K_2$ : fator de correção para o S.A.S., relacionando as diferentes temperaturas (adimensional).

Para  $F'_r U_L$ :

$$F'_r U_L = F_R U_L \cdot \frac{F'_{R'}}{F_R} \cdot 10^{-3} \quad (4.10)$$

Onde:

$F_R U_L$ : Coeficiente global de perdas do coletor, obtido nas tabelas do Programa Brasileiro de Etiquetagem (Inmetro) (W/(m<sup>2</sup>.K));

$\frac{F'_{R'}}{F_R}$ : fator de correção do conjunto coletor/trocador (na ausência desta informação recomenda-se adotar 0,95) (adimensional).

Para  $K_1$ :

$$K_1 = \left[ \frac{V}{75 \cdot A_c} \right]^{-0,25} \quad (4.11)$$

Onde:

V: Volume do tanque de água quente (L);

$A_c$ : Área do coletor (m<sup>2</sup>);

Recomenda-se que V e  $A_c$  obedçam a condição  $50 < V/A_c < 100$ .

Para cálculo de V calcula-se  $V'$ :

$$V' = Q_{dia} \cdot \frac{(T_{cons.} - T_{a.f.})}{(T_{arm.} - T_{a.f.})} \quad (4.12)$$

Onde:

$Q_{dia}$ : Consumo em litros de água quente por dia à temperatura de consumo de água quente  $T_{cons.}$  (L/dia);

$T_{cons.}$ : Temperatura de consumo da água quente (°C);

$T_{arm.}$ : Temperatura de armazenamento da água quente (°C);

$T_{a.f.}$ : Temperatura da água fria (°C).

Assim V será um valor inteiro maior que  $V'$  que se encaixe nos volumes padrões dos reservatórios de água quente comercializados. Segundo listagem do programa brasileiro de etiquetagem (PBE) do Inmetro os volumes mais usuais são 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800 e 1.000 litros.

Para  $K_2$ :

$$K_2 = \frac{11,6 + 1,18 T_{cons.} + 3,86 T_{a.f.} - 2,32 T_{amb}}{(100 - T_{amb})} \quad (4.13)$$

Onde:

$T_{cons.}$ : Temperatura de consumo da água quente (°C);

$T_{a.f.}$ : Temperatura da água fria (°C);

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente média mensal (°C).

Calcula-se então a energia útil mensal coletada ( $UE_{mês}$ ) pelo S.A.S. pela equação:

$$UE_{mês} = f \cdot DE_{mês} \quad (4.14)$$

Onde:

$UE_{mês}$ : Energia útil mensal coletada (kWh/mês);

$f$ : Fração solar mensal (adimensional);

$DE_{mês}$ : Demanda energética mensal (kWh/mês).

Para calcular a fração solar anual ( $F$ ) utiliza-se:

$$F = \frac{\sum_1^{12} EU_{mês}}{\sum_1^{12} DE_{mês}} \quad (4.15)$$

Onde:

$UE_{mês}$ : Energia útil mensal coletada (kWh/mês);

$DE_{mês}$ : Demanda energética mensal (kWh/mês).

As frações solares mensais ( $f$ ) e a anual ( $F$ ) são dependentes da área do coletor adotada. Caso a fração solar anual obtida seja inferior a 70%, valor recomendado pela NBR 15569 e RTQ-R, deve-se repetir os cálculos até que esta condição seja atingida, observando-se também a proporção  $50 < V/Ac < 100$ .

No presente trabalho dimensionou-se primeiramente um S.A.S. para uma residência unifamiliar com capacidade de 4 banhos quentes por dia, com duração de 10 minutos e vazão de 10 litros por minuto, por ser essa a configuração mais comumente encontrada em projetos. O dimensionamento resultou num S.A.S. com tanque de armazenamento de água quente de 300 litros, três coletores solares de 1,01 m<sup>2</sup>, com área total de 3,03 m<sup>2</sup>,  $F_R U_L$  igual a 4,22,  $F_R(\tau\alpha)_n$  de 0,76 e Fração solar de 73,25%.

Um dos objetivos deste trabalho é avaliar a utilização de múltiplos tanques de armazenamento de água quente. Assim, para um tanque de 300 litros, pode haver apenas a sua subdivisão em três tanques de 100 litros, ou um tanque de 100 mais outro de 200 litros, o que limita muito as possibilidades de análise de diferentes configurações de múltiplos tanques. (Observação: na tabela do programa brasileiro de etiquetagem do Inmetro há apenas um modelo de tanque com 100 litros e nenhum modelo menor que este.)

Dimensionou-se então um segundo S.A.S., alterando o número de banhos diários de 4 para 8, mantendo-se a duração e a vazão. Resultando em um S.A.S. com tanque de armazenamento de água quente de 600 litros, seis coletores solares de 1,01 m<sup>2</sup>, com área total de 6,06 m<sup>2</sup>,  $F_R U_L$  igual a 4,22,  $F_R(\tau\alpha)_n$  de 0,76 e Fração solar de 73,25%.

Por fim, dimensionou-se também um terceiro S.A.S. com capacidade para 14 banhos quentes por dia (também mantidas duração de 10 min e vazão de 10L/min). Este com reservatório de água quente de 1000 litros, 6 coletores solares de 1,81 m<sup>2</sup>, com área total de 10,86 m<sup>2</sup>,  $F_R U_L$  igual a 4,22,  $F_R(\tau\alpha)_n$  de 0,76 e Fração solar de 74,15%.

Essas três configurações servirão de base para as simulações e comparações deste trabalho, possibilitando avaliar o impacto da utilização de múltiplos tanques em sistemas de pequeno, médio e grande porte. É importante salientar que existem S.A.S. bem maiores que os apresentados, com reservatório 6 a 7 mil litros de água quente, geralmente encontrados em grandes hotéis e hospitais.

## 5. Modelagem do Simulador

### 5.1. Insolação no Plano Inclinado

Os valores de insolação fornecidos pela NREL referem-se a uma área de 1m<sup>2</sup> no plano horizontal. Faz-se necessário converter esses dados para insolação em um plano inclinado. De acordo com Duffie et al. (1977), a radiação difusa  $I_d$  (do inglês, diffuse irradiation), refletida pelas nuvens, pelo solo ou pelas edificações próximas à área de coleta de dados, pode ser considerada a mesma para o plano horizontal e o plano inclinado, justamente pelo fato de não ter uma fonte definida. Já a radiação direta  $I_b$  (do inglês, beam irradiation), como o próprio nome diz, vem diretamente do Sol ao plano horizontal e por isso precisa ser calculada para o plano inclinado por uma razão  $R_b$  (do inglês, beam ratio).  $R_b$  é dado por:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi + \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\varphi + \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta} \quad (5.1)$$

Onde:

$\varphi$ : Latitude do local de instalação do S.A.S.. Localização angular ao norte ou sul do equador, norte positivo e sul negativo,  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$  (graus);

$\beta$ : Inclinação do plano do coletor em relação ao plano horizontal,  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ , se  $\beta > 90^\circ$  significa que a superfície inclinada está com a face voltada para o solo (graus);

$\delta$ : Declinação solar – posição angular do sol ao meio-dia em relação ao plano do equador,  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$  (graus);

$\omega$ : Ângulo horário – deslocamento angular do sol em relação ao meridiano local. Equivalente a 15° por hora, de manhã é negativo, de tarde é positivo, e igual a 0° ao meio-dia (graus).

A declinação solar  $\delta$  é dada por (Duffie et al., 1977):

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + n_{juliano}}{365} \right) \quad (5.2)$$

Onde:

$n_{juliano}$ : Número de dias Juliano.

Ou então, para uma maior precisão  $\delta$  pode ser calculado por (Spencer, 1971):

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \operatorname{sen} B \\ & - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \operatorname{sen} 2B \\ & - 0,002679 \cos 3B + 0,00148 \operatorname{sen} 3 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Onde:

$$B = (n_{\text{juliano}} - 1) \frac{360}{365}$$

$n_{\text{juliano}}$ : Número de dias Juliano.

Entretanto, a equação 5.1 não é indicada para os intervalos que englobam o nascer e o por do sol, produzindo valores distorcidos para  $R_b$ . Para esses casos utiliza-se a equação:

$$R_b = \frac{a}{b} \quad (5.4)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} a = & (\operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \varnothing \cos \beta - \operatorname{sen} \delta \cos \varnothing \operatorname{sen} \beta \cos \gamma) \cdot \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi \\ & + (\cos \delta \cos \varnothing \cos \beta \\ & + \cos \delta \operatorname{sen} \varnothing \operatorname{sen} \beta \cos \gamma) \cdot (\operatorname{sen} \omega_2 - \operatorname{sen} \omega_1) \\ & - (\cos \delta \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma) \cdot (\cos \omega_2 - \cos \omega_1) \end{aligned}$$

$$b = (\cos \varnothing \cos -\delta) \cdot (\operatorname{sen} \omega_2 - \operatorname{sen} \omega_1) + (\operatorname{sen} \varnothing \operatorname{sen} -\delta) \cdot \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi$$

Onde  $\omega_1$  é o ângulo horário ao nascer do sol, dado por:

$$\omega_1 = -\arccos (\tan \varnothing \cdot \tan -\delta)$$

(Por exemplo, no dia 1º de Janeiro à latitude de  $-22,90^\circ$ , o sol nasce às 5:19 h, e  $\omega_1$  é  $-100,35^\circ$ .)

Por sua vez,  $\omega_2$  é ângulo horário da hora cheia subsequente a  $\omega_1$ .  
(para o dia 1º de Janeiro à latitude de  $-22,9^\circ$ , a hora cheia subsequente ao nascer do sol é 6:00 h e  $\omega_2$  que é igual a  $-90,00^\circ$ , lembrando que de manhã é negativo, de tarde é positivo, e igual a  $0^\circ$  ao meio-dia)

Com o cálculo da razão  $R_b$  encontra-se a radiação no plano inclinado  $I_t$  (do inglês, tilt irradiation) pela fórmula:

$$I_t = I_b \cdot R_b + I_d \quad (5.5)$$

Onde:

$I_b$ : Radiação direta, (Wh/m<sup>2</sup>);

$R_b$ : Razão entre plano inclinado e plano horizontal;

$I_d$ : Radiação difusa, (Wh/m<sup>2</sup>).

## 5.2. Coletor Solar Plano

Para simulação do funcionamento dos coletores solares, necessita-se de três grupos de dados de entrada: os parâmetros do coletor, os parâmetros climáticos e os parâmetros do S.A.S.. Os parâmetros do coletor são obtidos junto ao Inmetro nas tabelas do programa brasileiro de etiquetagem. São eles as propriedades óticas  $F_R(\tau\alpha)_n$  (adimensional), que representam os ganhos de energia do coletor; as propriedades térmicas  $F_R U_L$  (em  $W/m^2.K$ ), que representam as perdas térmicas do coletor; e a área útil do coletor  $A_c$  ( $m^2$ ). Os parâmetros climáticos são a irradiação no plano do coletor  $I_t$  ( $Wh/m^2$ ), e a temperatura ambiente  $T_{amb}$  ( $^{\circ}C$ ), dados oriundos da NREL. Por fim os parâmetros do S.A.S., que são a temperatura da água na entrada do coletor  $T_e$  ( $^{\circ}C$ ) e a vazão mássica da água através coletor  $\dot{m}$  ( $kg/s$ ) (Não confundir com a vazão de consumo). Os valores são utilizados para encontrar a temperatura da água na saída do coletor  $T_s$  ( $^{\circ}C$ ) pela equação:

$$T_s = \frac{F_R(\tau\alpha)_n \cdot A_c \cdot I_t}{\dot{m} \cdot C_p} - \frac{F_R U_L \cdot (T_e - T_{amb}) \cdot A_c}{\dot{m} \cdot C_p} + T_e \quad (5.6)$$

Sendo  $C_p$  o calor específico da água, ( $W.s/kg.K$ ).

Calculada a temperatura de saída  $T_s$  é possível também calcular a eficiência do coletor  $\eta$  (adimensional) com a equação:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{A_c \cdot I_t} \quad (5.7)$$

Ainda quanto à eficiência do coletor, aplicando-se a equação 5.6 na 5.7 obtêm-se a equação:

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_n - \frac{F_R U_L \cdot (T_e - T_{amb})}{I_t} \quad (5.8)$$

Pela equação acima verifica-se que, quanto menor for a temperatura da água que entra no coletor, maior será a eficiência do mesmo. Assim, ressalta-se a importância de um perfil de temperatura bem estratificado no interior do reservatório térmico. Esse tema será aprofundado no item 5.3 – Reservatório de Água Quente.

A fórmula 5.6 é, em verdade, uma aproximação válida apenas para temperaturas de trabalho. Assim, conforme a temperatura da água na entrada do coletor aumenta, a fórmula gera temperaturas máximas de operação muito elevadas e discrepantes da realidade. Para os modelos de coletor utilizados nas simulações (TOSI JELLY FISH JF 10 VD e TOSI JELLY FISH JF 18 VD), ambos com fator de eficiência óptica do coletor -  $F_R(\tau\alpha)_n$  de 0,76 e fator de perda do coletor -  $F'_r U_L$  de 4,22 obtêm-se as seguintes temperaturas máximas:

Tabela 5.2-1 Temperatura Máxima para Equação Linear

Temperatura Ambiente (°C)	Insolação (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura Máxima (°C)
25	500	115,05
25	750	160,07
25	1000	205,09

Obviamente, os valores apresentados na tabela acima não refletem a realidade. Faz-se então necessário buscar uma fórmula não linear para o cálculo de  $T_s$ . De acordo com Cooper e Dunkle (1981) a equação 5.6 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$T_s = \frac{F_R(\tau\alpha)_n \cdot A_c \cdot I_t}{\dot{m} \cdot C_p} - \frac{a \cdot (T_e - T_{amb}) \cdot A_c}{\dot{m} \cdot C_p} - \frac{b \cdot (T_e - T_{amb})^2 \cdot A_c}{\dot{m} \cdot C_p} + T_e \quad (5.9)$$

Percebe-se que se  $a$  for igual ao  $F'_r U_L$  e  $b$  igual a zero, a equação 5.9 transforma-se novamente na equação linear 5.6. Assim sendo,  $a$  é um valor próximo de  $F'_r U_L$  e  $b$  um valor maior que zero.

Para o cálculo de  $a$  e  $b$  seria necessário conhecer diversos parâmetros de cada coletor, como material utilizado, número de tubos internos, diâmetro dos tubos, etc. Como esses valores não são informados nas tabelas do Inmetro, optou-se por ajustar  $a$  e  $b$  até que as eficiências do coletor para temperaturas de trabalho fossem similares nas equações 5.6 e 5.9, e que a temperatura máxima não fosse maior que 85 °C. Os valores de  $a$  e  $b$  foram estimados em 3,0 e 0,1715, respectivamente, obtendo-se assim as seguintes temperaturas máximas:

Tabela 5.2-2 Temperatura Máxima para Equação Não Linear

Temperatura Ambiente (°C)	Insolação (Wh/m <sup>2</sup> )	Temperatura Máxima (°C)
25	500	64,13
25	750	74,56
25	1000	83,40

Quanto à vazão mássica, sabe-se que a água varia de volume conforme sua temperatura. Entretanto, para as temperaturas consideradas nesse trabalho (acima de 10 °C e abaixo de 90 °C) essa variação, em torno de 2%, foi desprezada. Considera-se que 1 quilograma de água tenha volume igual a 1 litro, para qualquer temperatura.

Também sobre a vazão, os sistemas de aquecimento solar podem operar ou em circulação forçada, através de uma bomba d'água, ou em circulação natural, através das diferenças de densidade entre a água do tanque e a do coletor (também conhecido por efeito termossifão). A circulação forçada utiliza geralmente vazão constante, mas pode ser variada alterando-se a energia fornecida à bomba. O termossifão apresenta vazão variável, dependendo da diferença de temperatura da água no reservatório e no coletor solar.

No presente trabalho optou-se pela circulação forçada ao invés de vazão variável, por dois motivos: O F-Chart foi desenvolvido para sistemas de circulação forçada, embora haja trabalhos que adaptam o F-Chart para circulação natural (Malkin, 1985). Como segundo motivo, os parâmetros aferidos pelo Inmetro,  $F_R(\tau\alpha)_n$  e  $F_R U_L$ , variam em função da vazão, sendo válidos apenas para a vazão utilizada nos testes (no valor de 1L/(min.m<sup>2</sup>), 1 litro por minuto por metro quadrado de área do coletor). Faz-se importante salientar que a vazão padrão utilizada nas aferições do Inmetro não é, necessariamente, a mais eficiente para determinado coletor, servindo então apenas para homogeneizar os resultados dos testes dos diferentes modelos.

O coletor solar é, em última análise, um trocador de calor entre o meio e o reservatório de água quente, podendo tanto injetar calor do meio para o tanque (que é o efeito desejado), quanto liberar calor do tanque para o meio (indesejado). Na prática são utilizados dispositivos para impedir a perda térmica. No caso do termossifão, utiliza-se uma válvula de retenção que impede refluxo no coletor. Para os sistemas forçados, são utilizados sensores de temperatura para aferir a temperatura da água na saída do tanque (que é a temperatura de entrada no coletor  $T_e$ ) e a temperatura de saída do coletor,  $T_s$ . Assim o sistema aciona a bomba d'água somente quando  $T_s$  é maior que  $T_e$ . Contudo, observa-se também

no modelo a energia necessária para o acionamento da bomba d'água. Mesmo que a temperatura de saída da água seja maior que a de entrada no coletor, a bomba só será acionada se for mais compensador liga-la do que ligar a resistência elétrica.

Os coletores solares podem ser instalados em série (a saída d'água do primeiro coletor é conectada à entrada do segundo coletor) ou em paralelo (o fluxo d'água que sai do reservatório em direção aos coletores se divide igualmente entre todos os coletores, e depois de aquecido se junta novamente e retorna ao tanque). É possível também encontrar conjuntos de coletores ligados em série (chamados de bateria), e as baterias serem ligadas em paralelo. Os diferentes tipos de arranjos produzem resultados diferentes. Os coletores em série apresentam temperaturas de saída mais elevadas, entretendo menor eficiência. Já as instalações em paralelo apresentam maior dificuldade de instalação, pois assimetrias nas tubulações podem causar vazões distintas em cada coletor, comprometendo o funcionamento do sistema. O foco deste trabalho é o estudo da utilização de múltiplos tanques no S.A.S., assim não foram avaliadas as diferenças entre os tipos de conexões dos coletores, que no algoritmo encontram-se em paralelo.

### 5.3. Reservatório de Água Quente

Os sistemas de aquecimento solar comumente utilizam tanques horizontais (isto é, supondo que um tanque de armazenamento seja um cilindro, sua altura  $H$  encontra-se na posição horizontal). Isso ocorre porque a grande maioria dos projetos de S.A.S. tem que se adaptar a uma edificação já existente. Sendo o S.A.S. instalado nos telhados das casas, dificilmente há altura suficiente para que o tanque seja posicionado na vertical. Optar pelo tanque na horizontal soluciona uma questão de instalação, mas gera um problema de operação.

Como visto pela fórmula 5.8 a eficiência do coletor solar é maior quanto menor for a temperatura da água que entra no coletor. Considerando que a densidade da água varia com a temperatura, a água mais quente dirige-se ao topo do reservatório, e a mais fria à base. Por esse motivo a água que sai do tanque em direção ao coletor é extraída pela base do reservatório e retorna pelo topo do mesmo. No tanque vertical existe uma distância maior entre a base e o topo (a própria altura  $H$  do cilindro) que permite uma melhor estratificação da água em função de sua densidade. No tanque horizontal a distância entre a base e o topo é menor (igual ao diâmetro do cilindro), fazendo com que a água quente se misture mais facilmente com a água fria. Também, para promover a estratificação das temperaturas dentro do tanque, a água fria, vinda da caixa d'água, entra no tanque pela base, e água quente, destinada ao consumo, sai do tanque pelo topo. Essa configuração é válida tanto para tanques horizontais como verticais.

Os tanques são usualmente compostos por um cilindro interno metálico (de aço inox ou cobre, por exemplo) e envoltos por material isolante térmico (de poliuretano ou fibra de vidro, por exemplo) e podem ou não ter uma resistência elétrica interna para aquecimento auxiliar da água. Além do armazenamento de água, o tanque deve ser capaz de armazenar o calor. A capacidade de armazenamento térmico varia conforme as características de cada tanque. O Inmetro, em seu programa brasileiro de etiquetagem, apresenta a perda específica de energia mensal (em kWh/(mês.L)) de diversos modelos de tanques, permitindo que o consumidor compare os mesmos. A metodologia de cálculo desse índice é apresentada pela portaria Inmetro nº 301/2012.

Com o intuito de estudar as condições mais eficientes de operação, neste trabalho optou-se pela simulação de tanques verticais. Optou-se também pelas equações de Hottel-Whilier-Bliss para o modelo unidimensional de múltiplos nós, que se caracteriza pela subdivisão do tanque em  $n$  volumes iguais e fixos, como se fossem discos sobrepostos. Cada nó apresenta temperatura uniforme. Sua

temperatura inicial é representada por  $T_{i,0}$ , temperatura do nó  $i$  no instante zero (em °C), com  $i$  variando de 1 até  $n$ . Cada nó troca calor com seus nós vizinhos ( $i+1$  e  $i-1$ ) e com o meio externo pela lateral do tanque. Já o nó 1 e o nó  $n$  trocam calor apenas com um nó vizinho, e trocam energia com o meio pela lateral do tanque e pela tampa superior ou inferior do tanque.

Oliveski (2000) compara o modelo unidimensional de múltiplos nós com um modelo bidimensional, transiente, não linear e dados experimentais, demonstrando que o modelo unidimensional simula satisfatoriamente as trocas térmicas de um tanque de armazenamento de água quente. Duffie et al. (1977) afirmam que 8 nós é número suficientemente grande para garantir precisão dos resultados e suficientemente pequeno para otimizar sua computação.

Para o cálculo das trocas de calor com o meio externo temos:

$$T_{i,t+1} = \left[ \frac{UA_{lateral} \cdot (T_{amb,t} - T_{i,t}) \cdot \Delta t}{m_i \cdot C_p} \right] + T_{i,t} \quad (5.10)$$

Onde:

$T_{i,t+1}$ : é a temperatura no nó  $i$  na iteração  $t+1$ , em °C;

$UA_{lateral}$ : é o coeficiente de troca de calor pela lateral do tanque, em W/K;

$T_{amb,t}$ : é a temperatura ambiente no instante  $t$ , em °C;

$\Delta t$ : é o tempo decorrido entre cada iteração, em segundos;

$m_i$ : é a massa de água contida no nó  $i$ , em kg;

$C_p$ : é o calor específico da água, 4.190 W.s/(kg.K)

$T_{i,t}$ : é a temperatura do nó  $i$  na iteração  $t$ , em °C.

$UA_{lateral}$  é o inverso da resistência térmica da lateral do tanque ( $R_l$ ) dado por:

$$R_l = \frac{\ln \left[ \frac{(r + e_{L\ met})}{r} \right]}{2 \cdot \pi \cdot H/n \cdot k_{met}} + \frac{\ln \left[ \frac{(r + e_{L\ met} + e_{L\ isol})}{(r + e_{L\ met})} \right]}{2 \cdot \pi \cdot H/n \cdot k_{isol}} + \frac{1}{h_{ar} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (r + e_{L\ met} + e_{L\ isol}) \cdot H/n}$$

Onde:

$r$ : é o raio do tanque, em metros;

$e_{L\ met}$ : é a espessura da chapa metálica na lateral do tanque, em metros;

$e_{L\ isol}$ : é a espessura lateral do revestimento isolante térmico, m;

$H$ : é a altura do tanque, em metros;

$n$ : é o número de nós;

$k_{met}$ : é a condutividade térmica do metal, em W/m.K;

$k_{isol}$ : é a condutividade térmica do isolante, em W/m.K;

$h_{ar}$ : é o coeficiente de transferência de calor do ar, em W/m<sup>2</sup>.K.

Para a base e o topo do tanque as perdas térmicas para o meio são maiores:

$$T_{b/t, t+1} = \left[ \frac{\{UA_{b/t} \cdot (T_{amb,t} - T_{b/t,t}) + UA_{lateral} \cdot (T_{amb,t} - T_{b/t,t})\} \cdot \Delta t}{m_{b/t} \cdot C_p} \right] + T_{b/t,t} \quad (5.11)$$

Onde:

$T_{b/t, t+1}$  é a temperatura no nó da base ou do topo na iteração t+1, em °C;

$UA_{b/t}$  é o coeficiente de troca de calor pela base ou topo do tanque, em W/K.

$UA_{b/t}$  é o inverso da resistência térmica da tampa superior ou inferior do tanque ( $R_{b/t}$ ) dado por:

$$R_{b/t} = \frac{e_{T\ met}}{k_{met} \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{e_{T\ iso\ b/t}}{k_{iso} \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{1}{h_{ar} \cdot \pi \cdot r^2} \quad (5.12)$$

Onde:

r: é o raio do tanque, em metros;

$e_{T\ met}$ : é a espessura da chapa metálica na tampa do tanque, em metros;

$e_{T\ iso}$ : é a espessura do revestimento isolante térmico na tampa do tanque, em metros;

$k_{met}$ : é a condutividade térmica do metal, em W/m.K;

$k_{isol}$ : é a condutividade térmica do isolante, em W/m.K;

$h_{ar}$ : é o coeficiente de transferência de calor do ar, em W/m<sup>2</sup>.K.

Há de se calcular também as trocas internas de temperatura. À cada iteração, os nós interagem com seus dois nós vizinhos, sendo a área de troca de calor igual à área transversal do tanque.

$$T_{i,t+1} = \frac{\left\{ \left[ \frac{k_{\acute{a}gua} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (T_{i-1,t} - T_{i,t})}{H/n} \right] + \left[ \frac{k_{\acute{a}gua} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (T_{i+1,t} - T_{i,t})}{H/n} \right] \right\} \cdot \Delta t}{2 \cdot m_i \cdot C_p} + T_{i,t} \quad (5.13)$$

Onde:

$k_{\acute{a}gua}$ : é a condutividade térmica da água, em (J/s)/(m.K);

r: é o raio do tanque, em metros;

$T_{i,t}$ : é a temperatura do nó i no instante t, em °C;

$T_{i-1,t}$ : é a temperatura do nó anterior no instante t, em °C;  
 $T_{i+1,t}$ : é a temperatura do nó posterior no instante t, em °C;  
 $\Delta t$ : é o tempo decorrido em cada iteração, em segundos;  
 $m_i$ : é a massa de água do nó i, em kg;  
 $C_p$ : é o calor específico da água, em J/ (kg.K).

Para os nós 1 e n as trocas internas de calor acontecem apenas com o nó i+1 ou n-1, respectivamente. Ficando então a equação 5.13 igual a:

$$T_{b/t,t+1} = \frac{\left\{ \left[ \frac{k_{\text{água}} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (T_{i+1(\text{ou } n-1),t} - T_{b/t,t})}{H/n} \right] \right\} \cdot \Delta t}{2 \cdot m_i \cdot C_p} + T_{b/t,t} \quad (5.14)$$

Contudo, por ser o interior do tanque constituído de metal, que costuma ser bom condutor de calor, há também trocas de energia entre os nós propiciada pela parede interna do tanque. Para captar esse efeito Klein (Klein, S. A. et al., 1990. "TRNSYS 13.1 User's manual" apud Oliveski, 2000) propõe utilizar um ajuste à condutividade da água e assim calcular a condutividade térmica efetiva,  $k_{\text{efetiva}}$ , em (J/s)/(m.K). Dada por:

$$k_{\text{efetiva}} = k_{\text{água}} + k_{\text{met}} \cdot \frac{A_{t,\text{parede}}}{A_{t,\text{fluido}}} \quad (5.15)$$

Onde:

$k_{\text{met}}$  : é a condutividade térmica do metal, em (J/s)/(m.K);  
 $A_{t,\text{parede}}$ : é a área transversal da parede interna metálica, em m<sup>2</sup>;  
 $A_{t,\text{fluido}}$ : é a área transversal do fluido, em m<sup>2</sup>

As equações são replicadas no algoritmo para até seis tanques, cada qual com volumes de 100 L, 200 L, 300 L, 400 L, 500 L, 600 L, 800 L ou 1.000 L. Todos equipados com timer (que pode estar ativo ou inativo), com termostato (com temperatura mínima de 48 °C e máxima de 50 °C) e aquecedor interno elétrico de 3 kW. Os tanques estão ligados em série, ou seja, no caso de seis tanques, o tanque A abastece o chuveiro, o tanque B abastece A, C abastece B, D abastece C, E abastece D, F abastece E, e o tanque F é abastecido de água fria (considerada com temperatura constante de 20 °C) pela caixa d'água. Caso a simulação exija apenas três tanques, os reservatórios D, E e F são anulados, e a caixa d'água abastece o último tanque restante, no caso o C. Assim é possível

simular um S.A.S com um ou até seis reservatórios. Cada reservatório está conectado ao conjunto de coletores solares utilizados na simulação. Numa situação real, essas conexões seriam controladas por meio de eletroválvulas para que, em determinado momento, apenas determinado tanque esteja conectado ao conjunto de coletores. Um resumo esquemático para um S.A.S. com três reservatórios é apresentado a seguir:

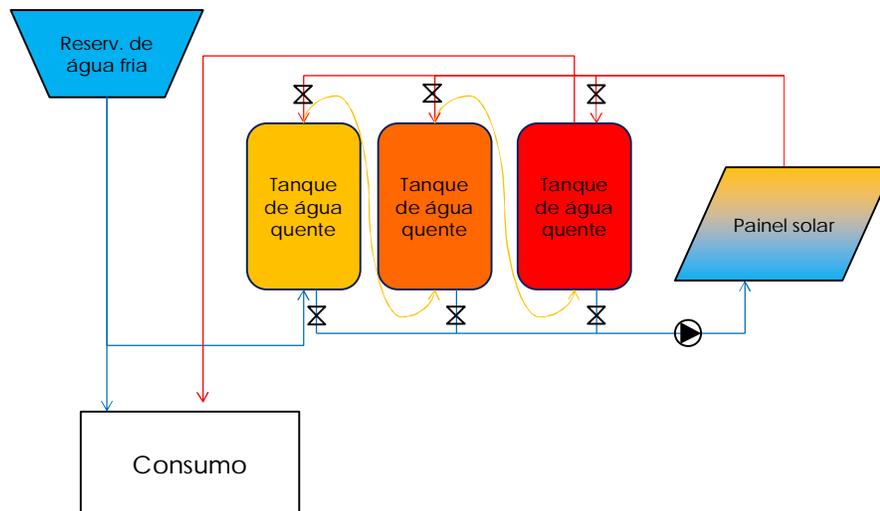


Figura 5.3-1 Resumo Esquemático – S.A.S. com 3 tanques

#### 5.4. Tubulações

Para simplificação do algoritmo, não serão simuladas as tubulações. As tubulações de água quente, quando bem isoladas termicamente representam pequena parcela das perdas de energia uma vez que a grande maioria do volume de água encontra-se no reservatório térmico e não na tubulação.

#### 5.5. Consumo de Água Quente

Conforme o estipulado para o dimensionamento do S.A.S., foram escolhidos três cenários: O primeiro com consumo diário de 400 litros de água a 40 °C, equivalente a quatro banhos de 10 minutos com vazão no chuveiro de 10 L/min. O segundo de 800 L/dia, equivalente a oito banhos e o terceiro cenário com consumo de 1.400 L/dia, equivalente a 14 banhos por dia.

Entretanto, é preciso definir a distribuição desses banhos ao longo do dia, pois, se todos os banhos ocorrem no período da manhã, ou todos no período da noite, o comportamento gerará resultados distintos nas simulações.

Foram gerados cinco perfis de distribuição de consumo d'água: Manhã – com todos os banhos ocorrendo consecutivamente a partir das 6 horas da manhã; Tarde – com os banhos ocorrendo consecutivamente a partir do meio-dia; Noite – com banhos ocorrendo consecutivamente a partir das 20 horas; Distribuído – Com o primeiro banho às 6 horas e o último às 20, e os demais igualmente espaçados entre esse intervalo; e finalmente o Consumo Padrão – Com uma distribuição que simula as curvas de consumo residencial de energia elétrica, ou seja, com um pico médio de consumo iniciado às 6 da manhã, um pico pequeno em torno do meio-dia e um pico maior a partir das 19 horas.

## 5.6. Casos Simulados

Conforme citado anteriormente, foram estudados três cenários básicos: Cenário 01 – com total de 300 L de água quente armazenada; Cenário 02 – com 600 L de água quente; e Cenário 03 – com 1.000 L.

Para o Cenário 01 foram simulados os seguintes casos:

- **Boiler – Com Timer:** Para essa simulação foi considerado um único reservatório de água quente, com resistência elétrica interna. Não foi utilizada a energia solar para aquecimento d'água. A função timer foi utilizada para que o fluido fosse aquecido somente antes do consumo, e não a qualquer tempo. Esse caso é utilizado para verificar o quanto um sistema dependente unicamente de energia elétrica consome para fornecer o volume necessário de água quente.

- **Caso Base – Resistência Interna sem Timer:** Trata-se do modelo de S.A.S. mais básico. Possui um único tanque de água quente ligado ao conjunto de coletores solares. Possui resistência interna elétrica sem timer, ou seja, toda vez que o termostato estiver abaixo da temperatura mínima, a resistência elétrica é ligada.

- **Caso Base – Resistência Interna com Timer:** Similar ao caso anterior, porém com o advento do timer, que estipula em quais horários a resistência interna pode ser ligada.

- **Caso 01 – Resistência Interna com Timer:** Possui dois reservatórios (A e B). O tanque A é de 100 L, com resistência interna e timer. O tanque B tem volume de 200 L, sem resistência interna. Ambos os tanques estão conectados ao conjunto de coletores.

- **Caso 02 – Resistência Interna com Timer:** Possui três reservatórios (A, B e C). O três tanques tem volume igual a 100 L. Apenas o tanque A possui resistência interna e timer. Todos os tanques estão conectados ao conjunto de coletores.

- **Caso Base – Aquecedor de Passagem:** Possui um único tanque de água quente ligado ao conjunto de coletores solares. Não possui resistência interna elétrica, mas sim um aquecedor de passagem elétrico externo. O aquecedor de passagem verifica a temperatura da água que sai do reservatório, caso não esteja na temperatura estipulada de 40 °C, o aquecedor fornece a energia necessária para obter tal temperatura.

- **Caso 01 – Aquecedor de Passagem:** Possui dois reservatórios (A e B). O tanque A tem volume de 100 L e o B de 200 L, ambos sem resistência interna elétrica, mas sim um aquecedor de passagem elétrico externo ligado ao tanque A. Os dois tanques estão conectados ao conjunto de coletores.

- **Caso 02 – Aquecedor de Passagem:** Possui três reservatórios (A, B e C). O três tanques tem volume igual a 100 L. Sem resistência interna, mas sim um aquecedor de passagem externo ligado ao tanque A. Todos os tanques estão conectados ao conjunto de coletores.

As informações acima foram resumidas na tabela:

Tabela 5.6-1 Resumo dos Casos Estudados - Cenário 01

Caso	Tanque			Res. Interna (Tan. A)	Timer	Aquec. de Passagem	Conectados aos Coletores
	A	B	C				
Boiler	300 L	-	-	Sim	Sim	-	-
Caso Base - Res. Interna sem Timer	300 L	-	-	Sim	-	-	A
Caso Base - Res. Interna com Timer	300 L	-	-	Sim	Sim	-	A
Caso 01 - Res. Interna com Timer	100 L	200 L	-	Sim	Sim	-	A e B
Caso 02 - Resistência Interna com Timer	100 L	100 L	100 L	Sim	Sim	-	A, B e C
Caso Base - Aquecedor de Passagem	300 L	-	-	-	-	Sim	A
Caso 01 - Aquecedor de Passagem	100 L	200 L	-	-	-	Sim	A e B
Caso 02 - Aquecedor de Passagem	100 L	100 L	100 L	-	-	Sim	A, B e C

Para os Cenário 02 e 03, seguindo a mesma lógica explicada anteriormente, tem-se os seguintes casos resumidos nas tabelas:

Tabela 5.6-2 Resumo dos Casos Estudados – Cenário 02

Caso	Tanque						Resistência Interna (Tanque A)	Timer	Aquecedor de Passagem	Tanques Conectados aos Coletores
	A	B	C	D	D	F				
Boiler	600 L	-	-	-	-	-	Sim	-	-	
Caso Base - Res. Interna sem Timer	600 L	-	-	-	-	-	Sim	-	A	
Caso Base - Res. Interna com Timer	600 L	-	-	-	-	-	Sim	-	A	
Caso 01 - Res. Interna com Timer	100 L	500 L	-	-	-	-	Sim	-	A e B	
Caso 02 - Res. Interna com Timer	200 L	400 L	-	-	-	-	Sim	-	A e B	
Caso 03 - Res. Interna com Timer	300 L	300 L	-	-	-	-	Sim	-	A e B	
Caso 04 - Res. Interna com Timer	200 L	200 L	200 L	-	-	-	Sim	-	A, B e C	
Caso 05 - Res. Interna com Timer	100 L	100 L	100 L	100 L	100 L	100 L	Sim	-	A, B, C, D, E e F	
Caso Base - Aq. de Passagem	600 L	-	-	-	-	-	-	Sim	A	
Caso 01 - Aquecedor de Passagem	100 L	500 L	-	-	-	-	-	Sim	A e B	
Caso 02 - Aquecedor de Passagem	200 L	400 L	-	-	-	-	-	Sim	A e B	
Caso 03 - Aquecedor de Passagem	300 L	300 L	-	-	-	-	-	Sim	A e B	
Caso 04 - Aquecedor de Passagem	200 L	200 L	200 L	-	-	-	-	Sim	A, B e C	
Caso 05 - Aquecedor de Passagem	100 L	100 L	100 L	100 L	100 L	100 L	-	Sim	A, B, C, D, E e F	

Tabela 5.6-3 Resumo dos Casos Estudados – Cenário 03

Caso	Tanque						Resistência Interna (Tanque A)	Timer	Aquecedor de Passagem	Tanques Conectados aos Coletores
	A	B	C	D	E	F				
Boiler	1.000 L	-	-	-	-	-	Sim	-	-	
Caso Base - Res. Interna sem Timer	1.000 L	-	-	-	-	-	Sim	-	A	
Caso Base - Res. Interna com Timer	1.000 L	-	-	-	-	-	Sim	-	A	
Caso 01 - Res. Interna com Timer	200 L	800 L	-	-	-	-	Sim	-	A e B	
Caso 02 - Res. Interna com Timer	400 L	600 L	-	-	-	-	Sim	-	A e B	
Caso 03 - Res. Interna com Timer	500 L	500 L	-	-	-	-	Sim	-	A e B	
Caso 04 - Res. Interna com Timer	100 L	300 L	600 L	-	-	-	Sim	-	A, B e C	
Caso 05 - Res. Interna com Timer	200 L	300 L	500 L	-	-	-	Sim	-	A, B e C	
Caso 06 - Res. Interna com Timer	200 L	400 L	400 L	-	-	-	Sim	-	A, B e C	
Caso 07 - Res. Interna com Timer	200 L	200 L	200 L	200 L	200 L	-	Sim	-	A, B, C, D e E	
Caso Base - Aq. de Passagem	1.000 L	-	-	-	-	-	-	Sim	A	
Caso 01 - Aquecedor de Passagem	200 L	800 L	-	-	-	-	-	Sim	A e B	
Caso 02 - Aquecedor de Passagem	400 L	600 L	-	-	-	-	-	Sim	A e B	
Caso 03 - Aquecedor de Passagem	500 L	500 L	-	-	-	-	-	Sim	A e B	
Caso 04 - Aquecedor de Passagem	100 L	300 L	600 L	-	-	-	-	Sim	A, B e C	
Caso 05 - Aquecedor de Passagem	200 L	300 L	500 L	-	-	-	-	Sim	A, B e C	
Caso 06 - Aquecedor de Passagem	200 L	400 L	400 L	-	-	-	-	Sim	A, B e C	
Caso 07 - Aquecedor de Passagem	200 L	200 L	200 L	200 L	200 L	-	-	Sim	A, B, C, D e E	

Foram simulados também dois casos especiais. O primeiro é uma simplificação do projeto de S.A.S. com dois tanques. Ao invés dos dois tanques (A e B) estarem conectados aos coletores solares, apenas o tanque B se conecta aos painéis. Nesse caso não são necessárias as eletroválvulas para controle de qual tanque está ligado aos coletores solares. Esse caso especial recebeu o nome de **Simplificado**. O segundo caso é uma adaptação de um S.A.S. pré-existente, ou seja, os casos base dos cenários 01, 02 e 03 recebem mais um tanque, instalado entre o reservatório antigo e o chuveiro. Apenas o tanque adicional contará com resistência interna, e a do tanque antigo é desativada. Esse caso especial recebeu o nome de **Adaptado**.

A tabela a seguir apresenta todos os casos Simplificados e Adaptados:

Tabela 5.6-4 Resumo dos Casos Especiais

Caso	Tanque			Resist Int (Tan. A)	Timer	Aq. de Passagem	Tan. Conec. aos Coletores
	A	B	C				
<b>Cenário 01</b>							
Caso 01 - Simplificado	100 L	200 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso Base - Adaptado - 100 L	100 L	300 L	-	Sim	Sim	-	B
<b>Cenário 02</b>							
Caso 01 - Simplificado	100 L	500 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso 02 - Simplificado	200 L	400 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso 03 - Simplificado	300 L	300 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso Base - Adaptado - 100 L	100 L	600 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso Base - Adaptado - 200 L	200 L	600 L	-	Sim	Sim	-	B
<b>Cenário 03</b>							
Caso 01 - Simplificado	200 L	800 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso 02 - Simplificado	400 L	600 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso 03 - Simplificado	500 L	500 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso Base - Adaptado - 100 L	100 L	1.000 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso Base - Adaptado - 200 L	200 L	1.000 L	-	Sim	Sim	-	B
Caso Base - Adaptado - 300 L	300 L	1.000 L	-	Sim	Sim	-	B

## 6. Validação do Algoritmo

Afim de verificar a validade dos resultados obtidos nas simulações foram feitas comparações com os valores dos ensaios do Inmetro. Para os coletores solares, segundo a tabela do programa de etiquetagem do Inmetro, consta que os modelos escolhidos (TOSI JELLY FISH JF 10 VD e TOSI JELLY FISH JF 18 VD) apresentam produção média mensal de 90 kWh por cada m<sup>2</sup> de coletor. Nas simulações, para uma configuração básica de S.A.S. (apenas um reservatório de água quente, com aquecimento auxiliar elétrico interno, utilizando função timer), obteve-se para o cenário 01 (reservatório de 300 L) 94,41 kWh/(mês.m<sup>2</sup>), para o cenário 02 (600 L) 90,55 kWh/(mês.m<sup>2</sup>) e para o cenário 03 (1.000 L) 87,19 kWh/(mês.m<sup>2</sup>). Demonstrando assim forte coerência entre os valores simulados e os apresentados pelo Inmetro.

Para os reservatórios de água quente, comparou-se os resultados da perda específica de energia mensal (kWh/(mês.L)). O ensaio laboratorial consiste em encher completamente o tanque com água a 50 °C numa sala com temperatura controlada em 21 °C e, após 24 horas, aferir a temperatura média da água. Pela diferença das temperaturas inicial e final calcula-se a energia perdida em 24 horas. Multiplica-se o resultado por 30 e divide-se pelo volume do tanque para obter o resultado em kWh/(mês.L). O procedimento foi então replicado usando o algoritmo.

É possível observar na tabela a seguir que os valores obtidos na simulação são bastante coerentes com os valores do Inmetro:

Tabela 6-1 Perda Específica de Energia Mensal – Inmetro e Algoritmo

Volume do Reservatório (L)	Perda Específica de Energia Mensal (kWh/(mês.L))		Temperatura Média Final (°C) – 24 h	
	Inmetro	Simulação	Inmetro	Simulação
100	0,22	0,22	43,7	43,6
200	0,20	0,18	44,2	44,9
300	0,19	0,16	44,5	45,5
400	0,15	0,14	45,7	45,9
500	0,14	0,13	45,9	46,2
600	0,14	0,12	45,9	46,4
800	0,10	0,11	47,1	46,7
1.000	0,10	0,11	47,1	46,9

Por fim, é possível também comparar os resultados do algoritmo com os resultados encontrados através da metodologia F-Chart. O F-Chart dimensiona

um S.A.S. de tanque único, com resistência elétrica interna e sem timer. Quando comparadas as frações solares (percentual da energia total cedida ao sistema pelos painéis coletores) das duas metodologias, observa-se novamente coerência entre os resultados:

Tabela 6-2 Fração Solar – F-Chart e Algoritmo

Caso Base sem Timer	Fração Solar	
	F-Chart	Algoritmo
Cenário 01 – 300 L	73,2%	76,1%
Cenário 02 – 600 L	73,2%	75,0%
Cenário 03 – 1.000 L	74,1%	79,0%

## 7. Análise da Utilização de Múltiplos Tanques

### 7.1. Perdas Térmicas para o Meio

É possível observar na Tabela 6-1 que, mesmo numa situação extrema em que se passem 24 horas sem aquecimento da água, a queda de temperatura é pequena e a água permanece aquecida acima da temperatura requerida para banho (40 °C). Considerando-se um dia típico com 8 horas de insolação temos um período de 16 horas sem carga de energia solar no reservatório. Refazendo a Tabela 6-1 para esse intervalo de tempo tem-se:

Tabela 7.1-1 Temperatura Média Final em 16 Horas

Volume do Reservatório (L)	Temperatura Média Final (°C) - 16 h
	Simulação
100	45,6
200	46,5
300	46,9
400	47,2
500	47,4
600	47,5
800	47,7
1.000	47,9

Isso indica que as perdas no tanque são mais significativas pelo consumo do que pela transferência de calor para o meio. Como a proposta deste estudo é analisar a subdivisão de um determinado tanque em dois ou mais tanques, é preciso avaliar o quanto essa subdivisão aumentará perda de calor para o meio.

Para melhor comparação, as perdas energéticas dos sistemas dos três cenários foram simuladas. Nessa simulação os sistemas todos tinham inicialmente água a 50 °C e foram resfriando pelo período de 16 horas. Considerando o volume armazenado em cada sistema, e que a água fria estava a 20 °C, calcula-se a energia para aquece-la aos 50 °C. Essa é considerada a energia inicial de cada sistema (em kJ). Com o passar de 16 horas sem fornecer energia ao sistema, calcula-se quanto da energia inicial foi cedida ao meio. Os resultados são apresentados nos próximos três gráficos:

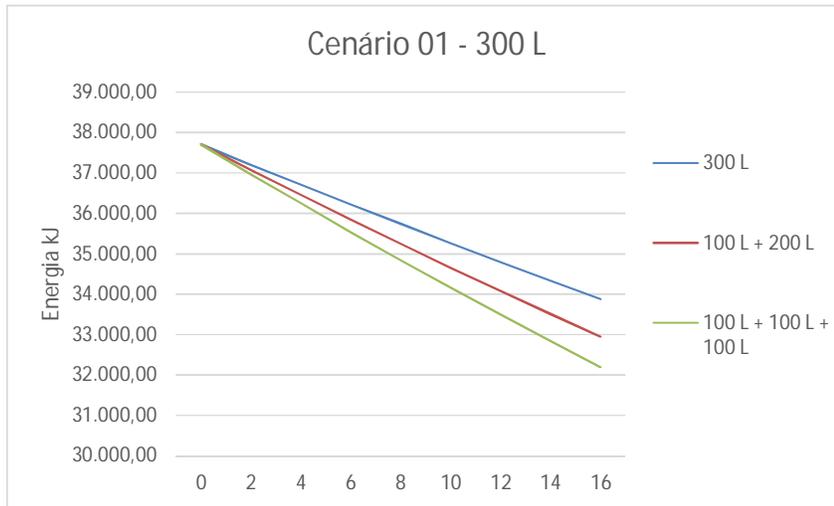


Figura 7.1-1 Energia armazenada em 16 horas - Cenário 01

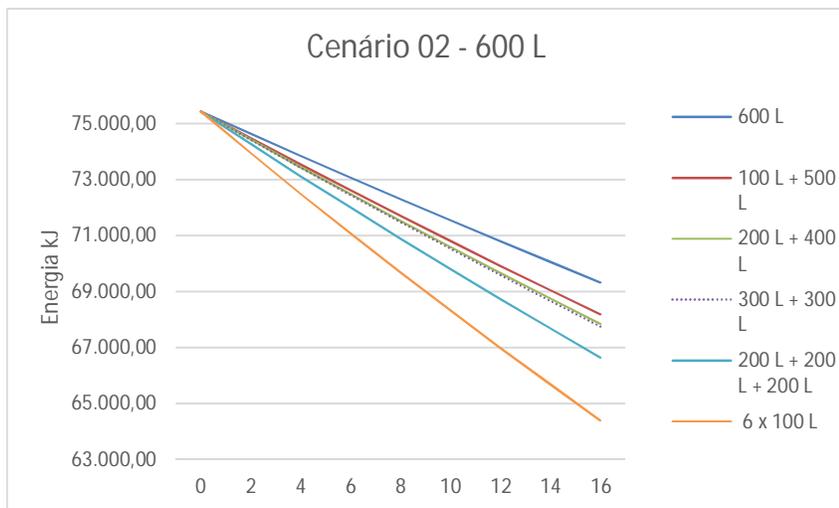


Figura 7.1-2 Energia armazenada em 16 horas - Cenário 02

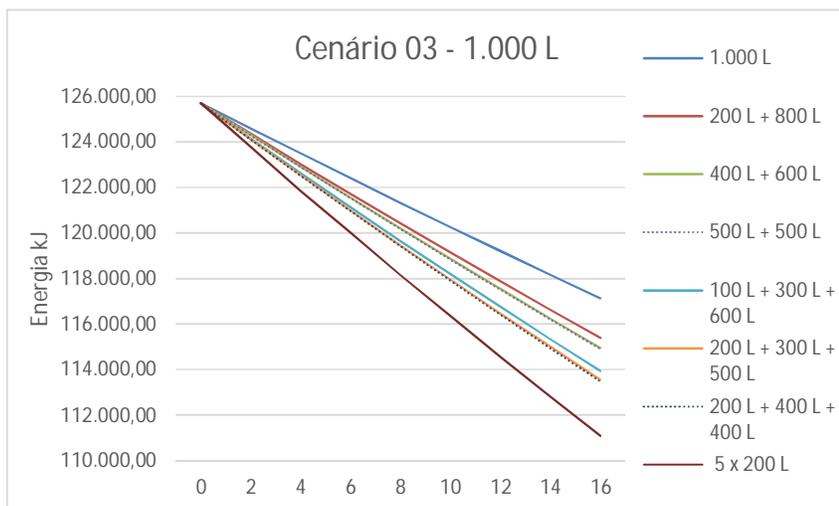


Figura 7.1-3 Energia armazenada em 16 horas - Cenário 03

Conforme o esperado, quando subdivide-se um tanque em dois ou mais tanques menores, a área de troca de calor com o meio ambiente aumenta, enquanto o volume total permanece o mesmo, aumentando assim as perdas térmicas. Cabe então verificar o quanto a captação de energia solar melhora em função dessa subdivisão, o que é feito no próximo item.

## 7.2. Ganhos na Captação de Energia Solar

A equação de eficiência dos coletores solares (Equação 5.8) diz que quanto menor for a temperatura de entrada no coletor, maior será a sua eficiência de conversão da energia solar em térmica para o sistema. A fim de obter essa maior eficiência optou-se pela utilização de tanques verticais para propiciar maior estratificação das temperaturas. Contudo, ainda assim ocorre mistura da água quente com a fria. Há também a transferências de calor entre essas camadas de água. Assim sendo, a subdivisão do volume total do sistema em tanques menores é uma forma de maximizar a estratificação das temperaturas.

Em um S.A.S. usual apenas um reservatório térmico está ligado ao conjunto dos coletores solares. Para um sistema de múltiplos tanques foi necessário optar por algum esquema de conexão dos tanques com os coletores. Conforme descrito anteriormente, optou-se por conectar cada um dos tanques ao conjunto de coletores. Assim, através de válvulas controladas pelo sistema, a cada instante um tanque estaria conectado aos coletores enquanto os demais desconectados.

Foi preciso então determinar um procedimento que decida qual tanque estará conectado aos painéis naquele instante, levando-se em consideração as possibilidades num S.A.S. real (por exemplo, no algoritmo calcular-se facilmente a temperatura média da água de um reservatório, mas um S.A.S. real não estará apto a fazê-lo, contando apenas com um ou dois sensores de temperatura por tanque). Foram elaboradas quatro ordens de prioridade de aquecimento. Elas podem ser divididas em dois grupos. O primeiro visa maximizar a eficiência dos coletores solares, o segundo visa priorizar sua eficácia. O primeiro aquece o tanque mais frio, seja ele qual for, para uma maior eficiência do coletor, o segundo prioriza o aquecimento dos tanques conforme sua proximidade com o consumo (isto é, priorizar A em detrimento de B, pois é A que fornece água para o consumo, e assim por diante).

O primeiro procedimento (chamado de Prioridade 01) verifica, a cada 30 minutos, qual dos tanques apresenta a menor temperatura de saída (que é a temperatura na base do tanque e também a temperatura de entrada  $T_e$  no coletor). Caso as temperaturas de todos os tanques sejam as mesmas, o tanque A sempre é priorizado. Se o empate for, por exemplo, entre os tanques B, C e D, o tanque B terá preferência. Ou seja, prioriza-se inicialmente a eficiência e em segundo plano o tanque mais próximo do consumo.

O segundo grupo prioriza a proximidade do tanque com o consumo. Assim, a Prioridade 02 conecta o tanque A aos coletores até que o termostato deste seja

desarmado (ou seja, até que a temperatura do tanque A seja maior que a temperatura máxima do termostato). Após aquecido o tanque A, segue-se o mesmo procedimento para o B e assim por diante. Caso o tanque A baixe de temperatura e rearme o termostato, este tanque volta a ser conectado aos coletores.

A Prioridade 03 é similar à 02. Entretanto é escalonada. O sistema verifica as condições expostas a seguir a cada 10 minutos. Em primeiro lugar o sistema conecta o reservatório A aos coletores até que sua temperatura ultrapasse os 35 °C, passando então para o B até atingir também os 35 °C e assim por diante. Após todos os tanques terem mais de 35 °C, prioriza-se novamente o tanque A até que atinja a temperatura de 45 °C. Atingida a temperatura alvo em A, passa-se para o B e assim até o último tanque. Com todos os tanques acima de 45 °C, prioriza-se o tanque A até atingir 50 °C, e assim por diante para os demais tanques. Após todos os tanques estarem a 50 °C, prioriza-se indeterminadamente o aquecimento do tanque A, até que uma das condições anteriores seja quebrada e o processo se repita.

A prioridade 04 é igual à 03, mudando apenas a ordem das temperaturas alvo. Conecta-se primeiramente A, até que atinja 35 °C. Em seguida B, também até 35 °C. Entretanto, diferente da Prioridade 03, conecta-se novamente A, até atingir 45 °C. Agora conecta-se C, até 35 °C. B novamente até 45 °C, retornando a A, até 50 °C. O processo continua e pode ser melhor compreendido pela figura abaixo que ilustra as ordens procedimentos realizados nas Prioridades 03 e 04:

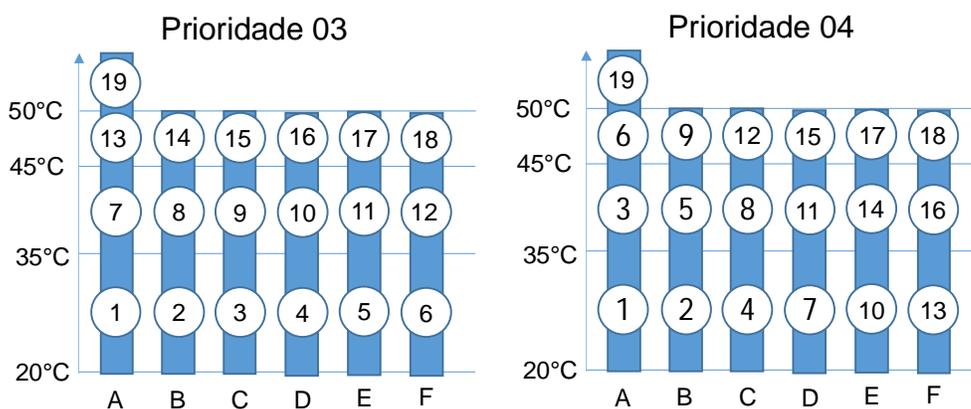


Figura 7.2-1 Ordem dos procedimentos das Prioridades 03 e 04

Foram então realizadas simulações para comparar o S.A.S. com tanque único aos S.A.S. de múltiplos tanques utilizando as quatro estratégias de

aquecimento. Nestas simulações não houve perda de energia para o meio ambiente, a fim de examinar somente o incremento de energia captada pelos coletores. São usados valores de insolação e temperatura de um dia médio. Este dia médio é a média dos 1.826 dias da base de dados utilizada. Foi adicionado 20% de insolação ao dia médio para representar um dia ótimo, e retirados 20% para um dia péssimo. Combinando as Prioridades de aquecimento (4 estratégias) com cada um dos casos (Cenário 01: 3 casos; Cenário 02: 6 casos; Cenário 03: 8 casos: Totalizando 17 casos) e combinado com cada um dos perfis de distribuição de consumo d'água (5 perfis de consumo mais uma situação sem consumo), combinados com três perfis de insolação (regular, ótimo e péssimo), realizou-se então mais de 1.000 simulações.

A seguir temos alguns dos gráficos gerados por essas simulações. O cenário 02 (S.A.S. com 600 L de água armazenada) foi escolhido para ilustrar os resultados obtidos. Primeiramente observa-se o desempenho de um S.A.S. de tanque único para um clima normal, clima com mais 20% de insolação e menos 20% de insolação, com temperatura inicial da água em 20 °C (Figura 7.2-2 Cenário 02 - Caso Base - Insolação +20% - Aquecimento sem consumo, Figura 7.2-3 Cenário 02 - Caso Base - Insolação Normal - Aquecimento sem consumo e Figura 7.2-4 Cenário 02 - Caso Base - Insolação -20% - Aquecimento sem consumo)

Em seguida são apresentados gráficos similares, mas referentes a um S.A.S. com três reservatórios de 200 L cada, submetidos às quatro diferentes prioridades de aquecimento. Os gráficos mostram a energia e a temperatura acumulada no período de um dia, sem consumo de água, para cada um dos tanques, e também a energia total acumulada pelo sistema. (Figura 7.2-5 à Figura 7.2-16)

Para comparação dos resultados dos gráficos elaborou-se a tabela a seguir:  
Tabela 7.2-1 Energia Total Acumulada pelo Sistema - Cenário 02 - Caso 04

Insolação	Cenário 02				
	Caso Base	Caso 04			
		Prioridade			
		01	02	03	04
+ 20%	106 MJ	112 MJ	91 MJ	98 MJ	97 MJ
Normal	92 MJ	96 MJ	84 MJ	89 MJ	89 MJ
- 20%	76 MJ	79 MJ	74 MJ	77 MJ	77 MJ

Embora as Prioridades 02, 03 e 04 sejam eficazes em aquecer os reservatórios mais próximos do consumo, em todos os casos simulados a Prioridade 01, por focar no aumento de eficiência dos coletores, apresentou maior absorção de energia solar pelo sistema. Tipicamente um S.A.S. baseia se no

armazenamento da maior quantidade possível de energia para posterior utilização. Por isso a Prioridade 01 foi a estratégia escolhida para as demais simulações.

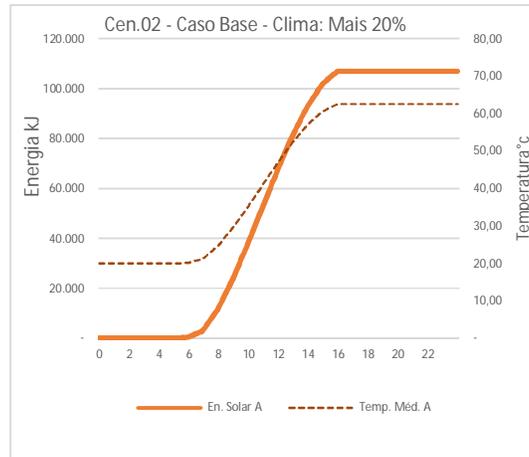


Figura 7.2-2 Cenário 02 - Caso Base - Insolação +20% - Aquecimento sem consumo

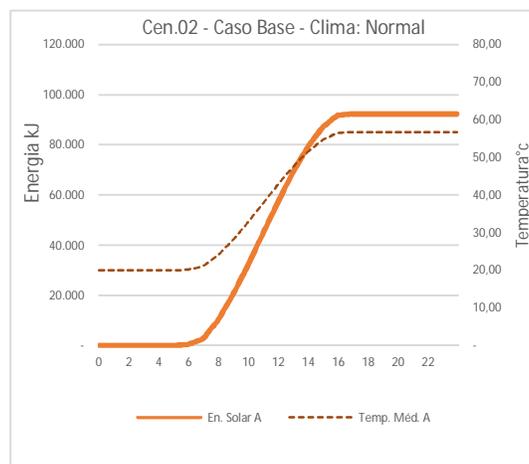


Figura 7.2-3 Cenário 02 - Caso Base - Insolação Normal - Aquecimento sem consumo

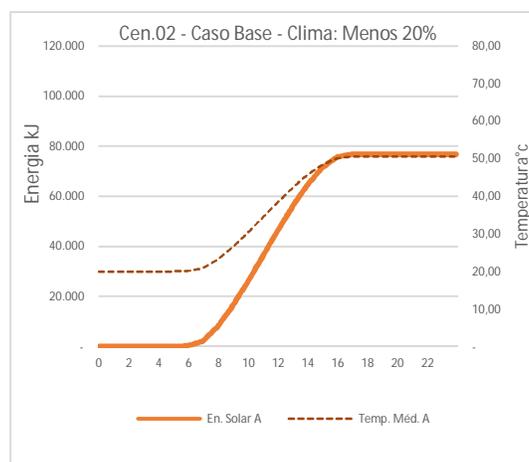


Figura 7.2-4 Cenário 02 - Caso Base - Insolação -20% - Aquecimento sem consumo

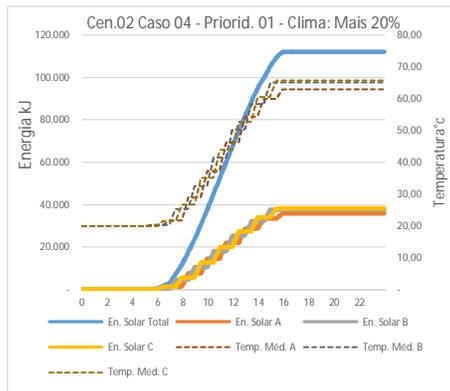


Figura 7.2-5 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação +20% - Prioridade 01

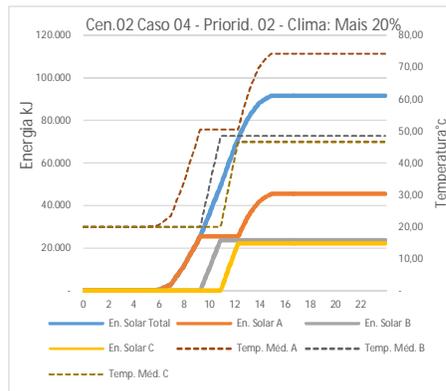


Figura 7.2-8 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação +20% - Prioridade 02

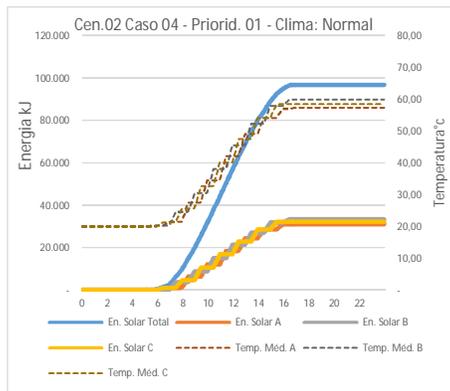


Figura 7.2-6 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação Normal - Prioridade 01

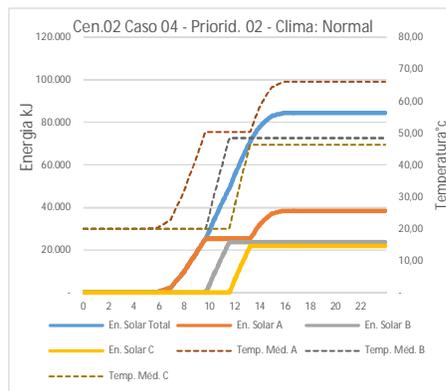


Figura 7.2-9 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação Normal - Prioridade 02

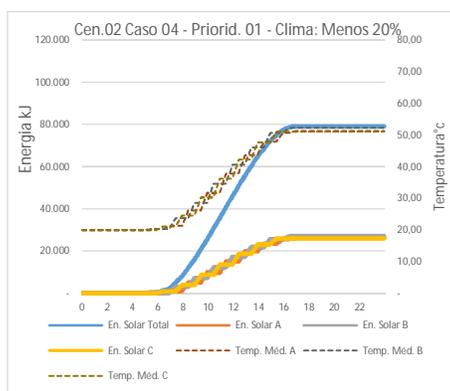


Figura 7.2-7 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação -20% - Prioridade 01

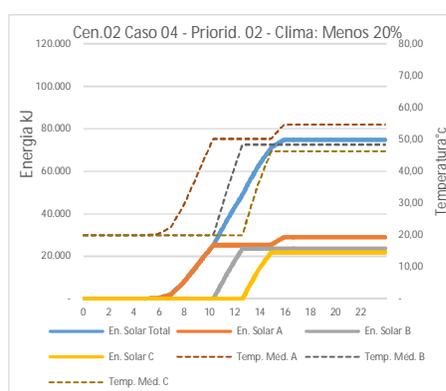


Figura 7.2-10 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação -20% - Prioridade 02

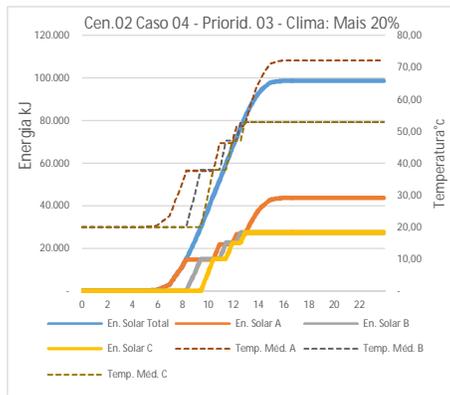


Figura 7.2-11 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação +20% - Prioridade 03

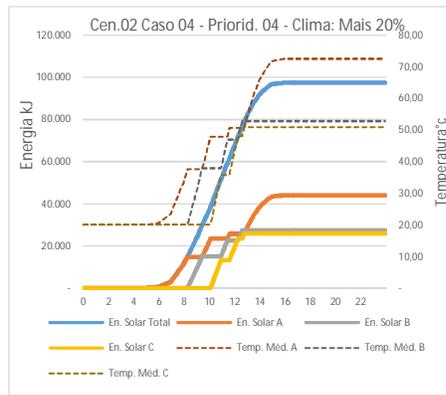


Figura 7.2-14 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação +20% - Prioridade 04

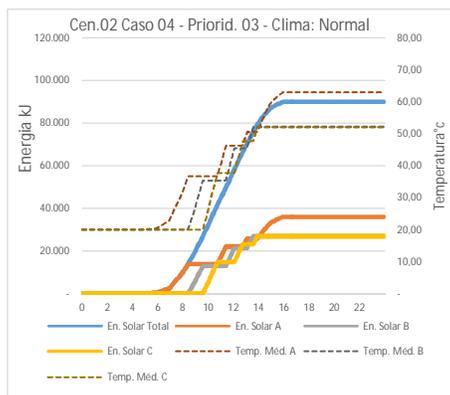


Figura 7.2-12 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação Normal - Prioridade 03

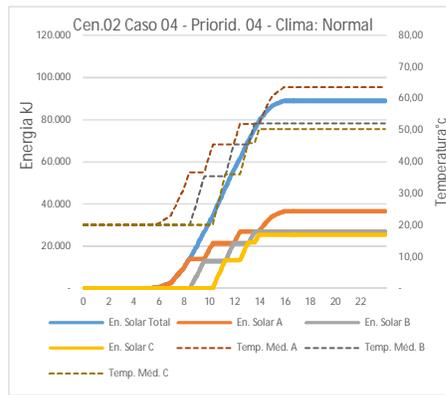


Figura 7.2-15 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação Normal - Prioridade 04

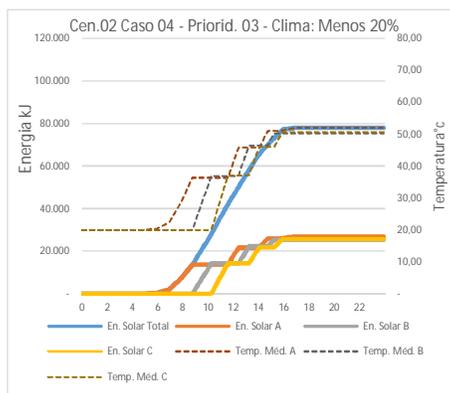


Figura 7.2-13 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação -20% - Prioridade 03

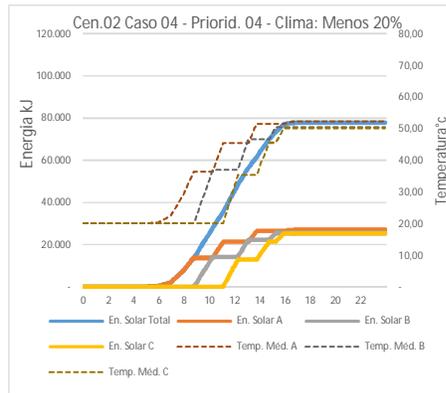


Figura 7.2-16 Cenário 02 - Caso 04 - Insolação -20% - Prioridade 04

## 8. Resultados da Simulação

Nas tabelas a seguir são apresentados os resultados obtidos nas simulações dos cenários e casos expostos anteriormente. Os valores apresentados representam a média diária dos 1826 dias simulados. Apenas os valores referentes ao custo com energia elétrica se encontram em base mensal (foi considerado custo de R\$ 0,50 por kWh).

A primeira coluna “Demanda Banho” é o consumo energético diário dos banhos considerando-se a água fria na temperatura de 20 °C e a temperatura de banho a 40 °C. A coluna “Fornecido Banho” mostra quanta energia em média foi fornecida diariamente para os banhos. Observa-se na coluna “% Não Fornecido” que todos os casos forneceram satisfatoriamente a energia demandada. A coluna “Perda Meio” mostra as perdas térmicas do reservatório para o meio ambiente. É possível observar que quanto maior o número de tanques de um caso, maior é a perda. A coluna “% Perdas” mostra a participação da perda para o meio na perda total do sistema (Descarga de água quente por consumo mais perdas por transferência de calor para o meio ambiente). “Aq. Solar” e “Aq. Elétrico” mostram, respectivamente, a energia fornecida ao sistema pelo aquecimento solar e elétrico. “Fração Solar” é a razão da energia solar fornecida pela energia total fornecida ao sistema (solar + elétrica). “R\$/mês” é a única coluna que não está em base diária, mas sim mensal. Essa coluna mostra o quanto se paga mensalmente pela energia elétrica consumida em cada caso. As colunas “% de ganho” mostram o quanto está se economizando, em termos de custos mensais de energia elétrica, em relação a um dos três primeiros casos. “% de Ganho 1” mostra o quanto se economiza ao escolher determinado caso ao invés de optar-se pelo Boiler. “% de Ganho 2” refere-se à economia feita ao optar por algum caso em relação ao Caso Base – Resistência Interna sem Timer. Já no “% de ganho 3” os casos são comparados ao Caso Base – Resistência Interna com Timer.

Tabela 8-1 Resultados das Simulações - Cenário 01

Cenário e Caso	Energia Retirada do Sistema (kJ/dia)						Energia Fornecida ao Sistema (kJ/dia)					
	Demanda Banho	Fornecido Banho	% Não Fornecido	Perda p/ Meio	% Perdas	Aq. Solar	Aq. Elétrico	Fração Solar	R\$/mês	% de ganho 1*	% de ganho 2*	% de ganho 3*
<b>Cenário 01 - 300 L</b>												
Boiler	33.520	33.517	0,01%	-1,025	2,97%	0	34.547	0,00%	R\$ 143,95	0,00%	-	-
Caso Base - Res. Interna sem Timer	33.520	33.520	0,00%	-6,189	15,58%	30214	9.512	76,06%	R\$ 39,63	72,47%	0,00%	-
Caso Base - Res. Interna com Timer	33.520	33.517	0,01%	-5,622	14,36%	34326	4.828	87,67%	R\$ 20,12	86,02%	49,24%	0,00%
Caso 01 - Res. Interna com Timer	33.520	33.516	0,01%	-7,913	19,10%	39505	1.941	95,32%	R\$ 8,09	94,38%	79,60%	59,80%
Caso 02 - Resistência Interna com Timer	33.520	33.515	0,01%	-9,334	21,78%	41229	1.637	96,18%	R\$ 6,82	95,26%	82,79%	66,10%
Caso Base - Aq. de Passagem	33.520	33.520	0,00%	-4,994	12,97%	37289	1.239	96,78%	R\$ 5,16	96,41%	86,98%	74,34%
Caso 01 - Aquecedor de Passagem	33.520	33.520	0,00%	-7,519	18,32%	40285	771	98,12%	R\$ 3,21	97,77%	91,90%	84,03%
Caso 02 - Aquecedor de Passagem	33.520	33.520	0,00%	-8,932	21,04%	41818	651	98,47%	R\$ 2,71	98,12%	93,15%	86,51%
Caso 01 - Simplificado	33.520	33.517	0,01%	-9,209	21,55%	40741	2.002	95,32%	R\$ 8,34	94,20%	78,95%	58,53%
Caso Base - Adaptado - 100 L	33.520	33.517	0,01%	-10,375	23,64%	42016	1.901	95,67%	R\$ 7,92	94,50%	80,02%	60,63%

Tabela 8-2 Resultados das Simulações - Cenário 02

Cenário e Caso	Energia Retirada do Sistema (kJ/dia)					Energia Fornecida ao Sistema (kJ/dia)						
	Demanda Banho	Fornecido Banho	% Não Fornecido	Perda p/ Meio	% Perdas	Aq. Solar	Aq. Elétrico	Fração Solar	R\$/mês	% de ganho 1*	% de ganho 2*	% de ganho 3*
<b>Cenário 02 - 600 L</b>												
Boiler	67.040	66.351	1,03%	-1.649	2,43%	0	68.008	0,00%	R\$ 283,37	0,00%	-	-
Caso Base - Res. Interna sem Timer	67.040	67.040	0,00%	-9.795	12,75%	57.665	19.202	75,02%	R\$ 80,01	71,77%	0,00%	-
Caso Base - Res. Interna com Timer	67.040	67.034	0,01%	-8.925	11,75%	65.847	10.141	86,65%	R\$ 42,25	85,09%	47,19%	0,00%
Caso 01 - Res. Interna com Timer	67.040	66.863	0,26%	-12.405	15,65%	76.162	3.138	96,04%	R\$ 13,07	95,39%	83,66%	69,06%
Caso 02 - Resistência Interna com Timer	67.040	67.031	0,01%	-12.520	15,74%	75.867	3.714	95,33%	R\$ 15,48	94,54%	80,66%	63,37%
Caso 03 - Resistência Interna com Timer	67.040	67.039	0,00%	-12.246	15,45%	75.146	4.170	94,74%	R\$ 17,37	93,87%	78,28%	58,88%
Caso 04 - Resistência Interna com Timer	67.040	67.030	0,02%	-14.896	18,18%	79.156	2.803	96,58%	R\$ 11,68	95,88%	85,40%	72,36%
Caso 05 - Resistência Interna com Timer	67.040	66.959	0,12%	-19.529	22,58%	84.293	2.230	97,42%	R\$ 9,29	96,72%	88,39%	78,01%
Caso Base - Aq. de Passagem	67.040	67.040	0,00%	-7.915	10,99%	72.075	2.906	96,12%	R\$ 12,11	95,73%	84,87%	71,34%
Caso 01 - Aquecedor de Passagem	67.040	67.040	0,00%	-12.007	15,56%	77.213	1.865	97,64%	R\$ 7,77	97,26%	90,29%	81,61%
Caso 02 - Aquecedor de Passagem	67.040	67.040	0,00%	-11.930	15,43%	77.348	1.652	97,91%	R\$ 6,88	97,57%	91,40%	83,71%
Caso 03 - Aquecedor de Passagem	67.040	67.040	0,00%	-11.546	14,98%	77.080	1.535	98,05%	R\$ 6,40	97,74%	92,00%	84,86%
Caso 04 - Aquecedor de Passagem	67.040	67.040	0,00%	-14.374	17,93%	80.179	1.269	98,44%	R\$ 5,29	98,13%	93,39%	87,49%
Caso 05 - Aquecedor de Passagem	67.040	67.040	0,00%	-19.056	22,45%	84.916	1.215	98,59%	R\$ 5,06	98,21%	93,67%	88,02%

Tabela 8-3 Resultados das Simulações - Cenário 02 - Casos Especiais

Cenário e Caso	Energia Retirada do Sistema (kJ/dia)					Energia Fornecida ao Sistema (kJ/dia)						
	Demanda Banho	Fornecido Banho	% Não Fornecido	Perda p/ Meio	% Perdas	Aq. Solar	Aq. Elétrico	Fração Solar	R\$/mês	% de ganho 1*	% de ganho 2*	% de ganho 3*
<b>Cenário 02 - 600 L</b>												
Caso 01 - Simplificado	67.040	66.940	0,15%	-14.822	18,13%	78.657	3.141	96,16%	R\$ 13,09	95,38%	83,64%	69,03%
Caso 02 - Simplificado	67.040	67.034	0,01%	-15.197	18,48%	78.502	3.765	95,42%	R\$ 15,69	94,46%	80,39%	62,87%
Caso 03 - Simplificado	67.040	67.039	0,00%	-14.798	18,08%	77.356	4.514	94,49%	R\$ 18,81	93,36%	76,49%	55,49%
Caso Base - Adaptado - 100 L	67.040	66.980	0,09%	-15.851	19,14%	79.993	2.883	96,52%	R\$ 12,01	95,76%	84,99%	71,57%
Caso Base - Adaptado - 200 L	67.040	67.034	0,01%	-17.380	20,59%	81.344	3.121	96,30%	R\$ 13,01	95,41%	83,74%	69,22%

Tabela 8-4 Resultados das Simulações - Cenário 03

Cenário e Caso	Energia Retirada do Sistema (kJ/dia)					Energia Fornecida ao Sistema (kJ/dia)						
	Demanda Banho	Fornecido Banho	% Não Fornecido	Perda p/ Meio	% Perdas	Aq. Solar	Aq. Elétrico	Fração Solar	R\$/mês	% de ganho 1*	% de ganho 2*	% de ganho 3*
<b>Cenário 03 - 1.000 L</b>												
Boiler	117.320	115.952	1,17%	-2.667	2,25%	0	118.632	0,00%	R\$ 494,30	0,00%	-	-
Caso Base - Res. Interna sem Timer	117.320	117.211	0,09%	-13.926	10,62%	103.636	27.556	79,00%	R\$ 114,82	76,77%	0,00%	-
Caso Base - Res. Interna com Timer	117.320	117.163	0,13%	-13.119	10,07%	113.620	16.711	87,18%	R\$ 69,63	85,91%	39,35%	0,00%
Caso 01 - Res. Interna com Timer	117.320	117.012	0,26%	-18.639	13,74%	130.240	5.470	95,97%	R\$ 22,79	95,39%	80,15%	67,27%
Caso 02 - Resistência Interna com Timer	117.320	117.316	0,00%	-18.605	13,69%	129.383	6.593	95,15%	R\$ 27,47	94,44%	76,07%	60,55%
Caso 03 - Resistência Interna com Timer	117.320	117.319	0,00%	-18.342	13,52%	128.677	7.038	94,81%	R\$ 29,33	94,07%	74,46%	57,88%
Caso 04 - Resistência Interna com Timer	117.320	116.969	0,30%	-22.670	16,23%	136.223	3.478	97,51%	R\$ 14,49	97,07%	87,38%	79,19%
Caso 05 - Resistência Interna com Timer	117.320	117.174	0,12%	-22.943	16,37%	136.275	3.903	97,22%	R\$ 16,26	96,71%	85,84%	76,64%
Caso 06 - Resistência Interna com Timer	117.320	117.193	0,11%	-22.938	16,37%	136.554	3.639	97,40%	R\$ 15,16	96,93%	86,80%	78,23%
Caso 07 - Resistência Interna com Timer	117.320	117.221	0,08%	-28.071	19,32%	142.166	3.192	97,80%	R\$ 13,30	97,31%	88,42%	80,90%

Tabela 8-5 Resultados das Simulações - Cenário 03 - Aquecedor de Passagem e Casos Especiais

Cenário e Caso	Energia Retirada do Sistema (kJ/dia)					Energia Fornecida ao Sistema (kJ/dia)						
	Demanda Banho	Fornecido Banho	% Não Fornecido	Perda p/ Meio	% Perdas	Aq. Solar	Aq. Elétrico	Fração Solar	R\$/mês	% de ganho 1*	% de ganho 2*	% de ganho 3*
<b>Cenário 03 - 1.000 L</b>												
Caso Base - Aq. de Passagem	117.320	117.320	0,00%	-11.842	9,58%	123.659	5.551	95,70%	R\$ 23,13	95,32%	79,86%	66,78%
Caso 01 - Aquecedor de Passagem	117.320	117.320	0,00%	-18.074	13,67%	132.282	3.170	97,66%	R\$ 13,21	97,33%	88,50%	81,03%
Caso 02 - Aquecedor de Passagem	117.320	117.320	0,00%	-17.753	13,42%	132.350	2.778	97,94%	R\$ 11,57	97,66%	89,92%	83,38%
Caso 03 - Aquecedor de Passagem	117.320	117.320	0,00%	-17.386	13,16%	132.136	2.625	98,05%	R\$ 10,94	97,79%	90,47%	84,29%
Caso 04 - Aquecedor de Passagem	117.320	117.320	0,00%	-22.280	16,24%	137.256	2.406	98,28%	R\$ 10,03	97,97%	91,27%	85,60%
Caso 05 - Aquecedor de Passagem	117.320	117.320	0,00%	-22.408	16,30%	137.538	2.251	98,39%	R\$ 9,38	98,10%	91,83%	86,53%
Caso 06 - Aquecedor de Passagem	117.320	117.320	0,00%	-22.452	16,30%	137.776	2.059	98,53%	R\$ 8,58	98,26%	92,53%	87,68%
Caso 07 - Aquecedor de Passagem	117.320	117.320	0,00%	-27.526	19,24%	143.162	1.750	98,79%	R\$ 7,29	98,52%	93,65%	89,53%
Caso 01 - Simplificado	117.320	117.150	0,14%	-23.025	16,43%	135.185	5.058	96,39%	R\$ 21,07	95,74%	81,65%	69,73%
Caso 02 - Simplificado	117.320	117.317	0,00%	-23.280	16,56%	134.454	6.207	95,59%	R\$ 25,86	94,77%	77,48%	62,86%
Caso 03 - Simplificado	117.320	117.319	0,00%	-22.745	16,24%	133.188	6.939	95,05%	R\$ 28,91	94,15%	74,82%	58,48%
Caso Base - Adaptado - 100 L	117.320	116.975	0,29%	-23.190	16,54%	136.264	3.979	97,16%	R\$ 16,58	96,65%	85,56%	76,19%
Caso Base - Adaptado - 200 L	117.320	117.236	0,07%	-25.018	17,59%	137.924	4.416	96,90%	R\$ 18,40	96,28%	83,97%	73,57%
Caso Base - Adaptado - 300 L	117.320	117.308	0,01%	-26.450	18,40%	139.288	4.563	96,83%	R\$ 19,01	96,15%	83,44%	72,69%

Os gráficos a seguir facilitam algumas comparações:

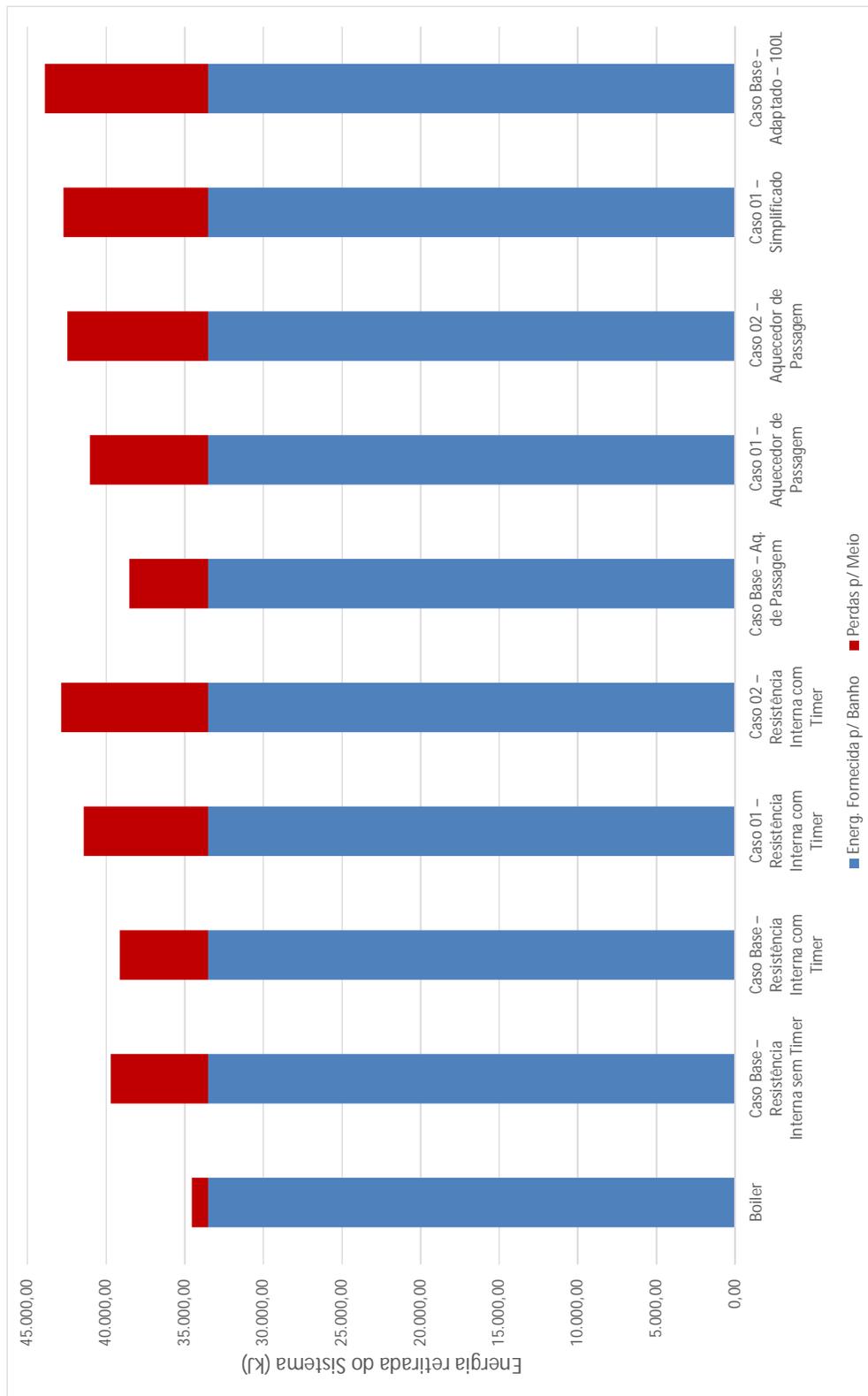


Figura 8-1 Perdas por Consumo e por Transferência para o Meio - Cenário 01 - 300 L



Figura 8-2 Fornecimento de Energia Solar e Elétrica com Custo Mensal de Energia Elétrica - Cenário 01 - 300 L

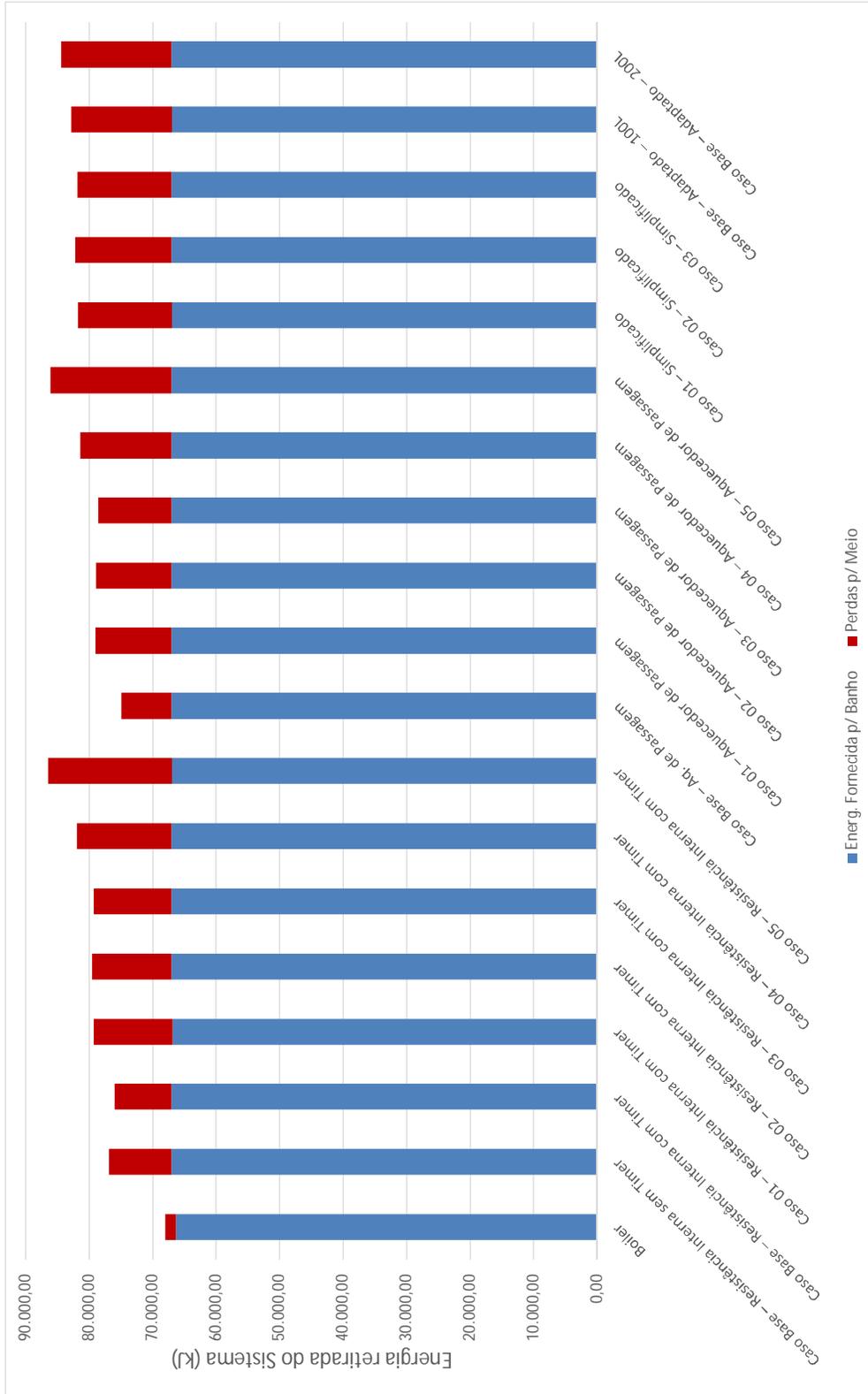


Figura 8-3 Perdas por Consumo e por Transferência para o Meio - Cenário 02 - 600 L

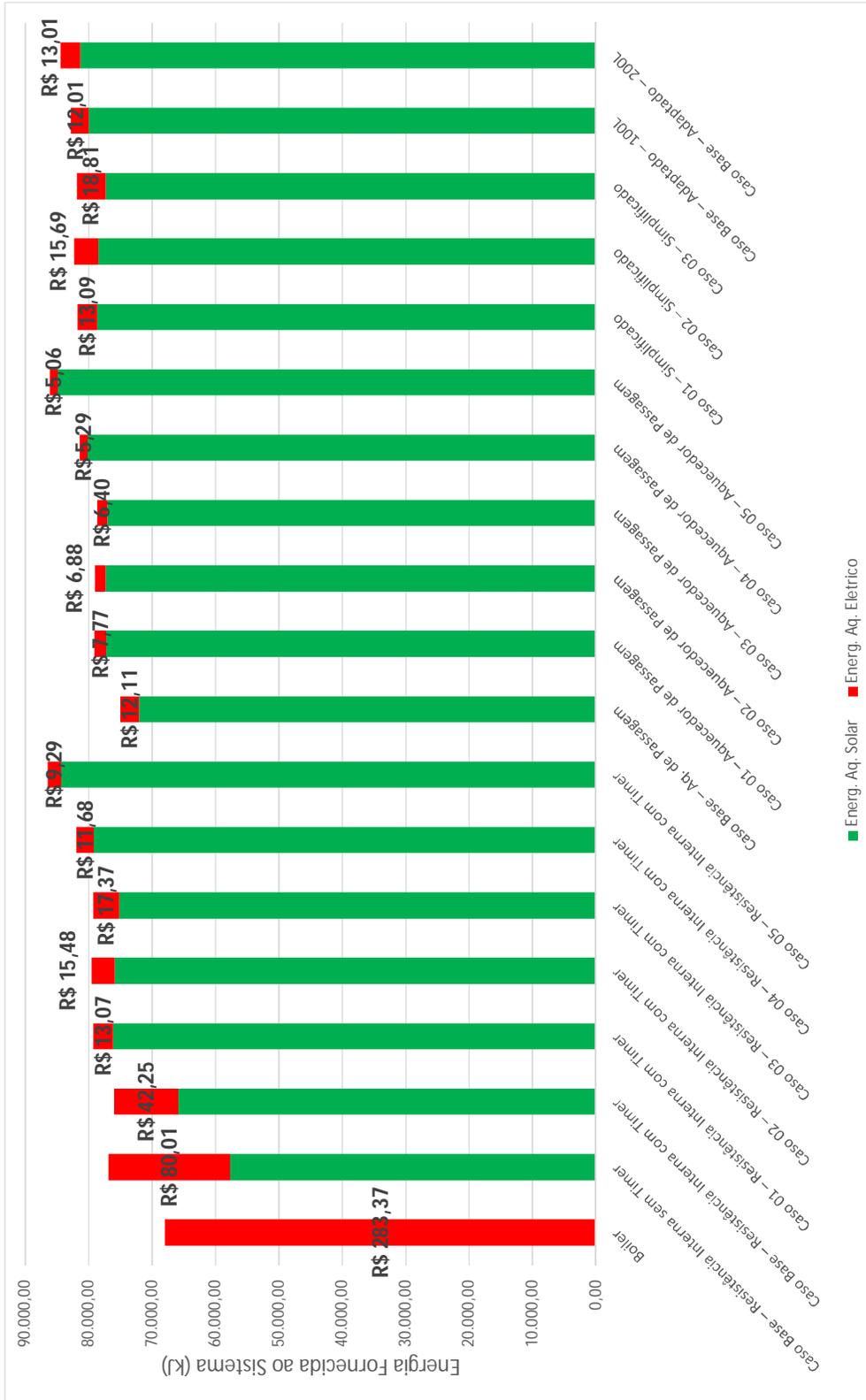


Figura 8-4 Fornecimento de Energia Solar e Elétrica com Custo Mensal de Energia Elétrica - Cenário 02 - 600 L

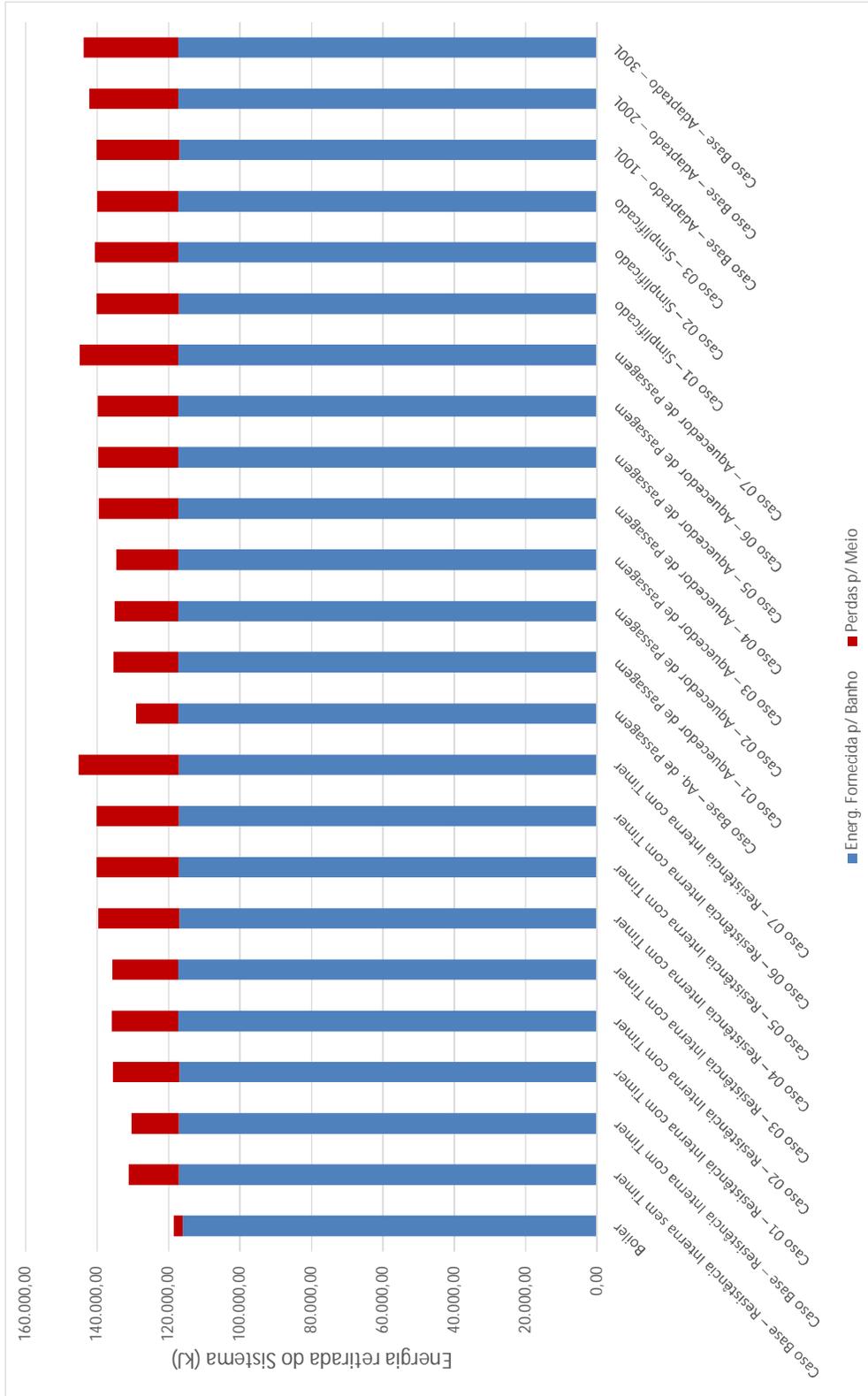


Figura 8-5 Perdas por Consumo e por Transferência para o Meio - Cenário 03 - 1.000 L

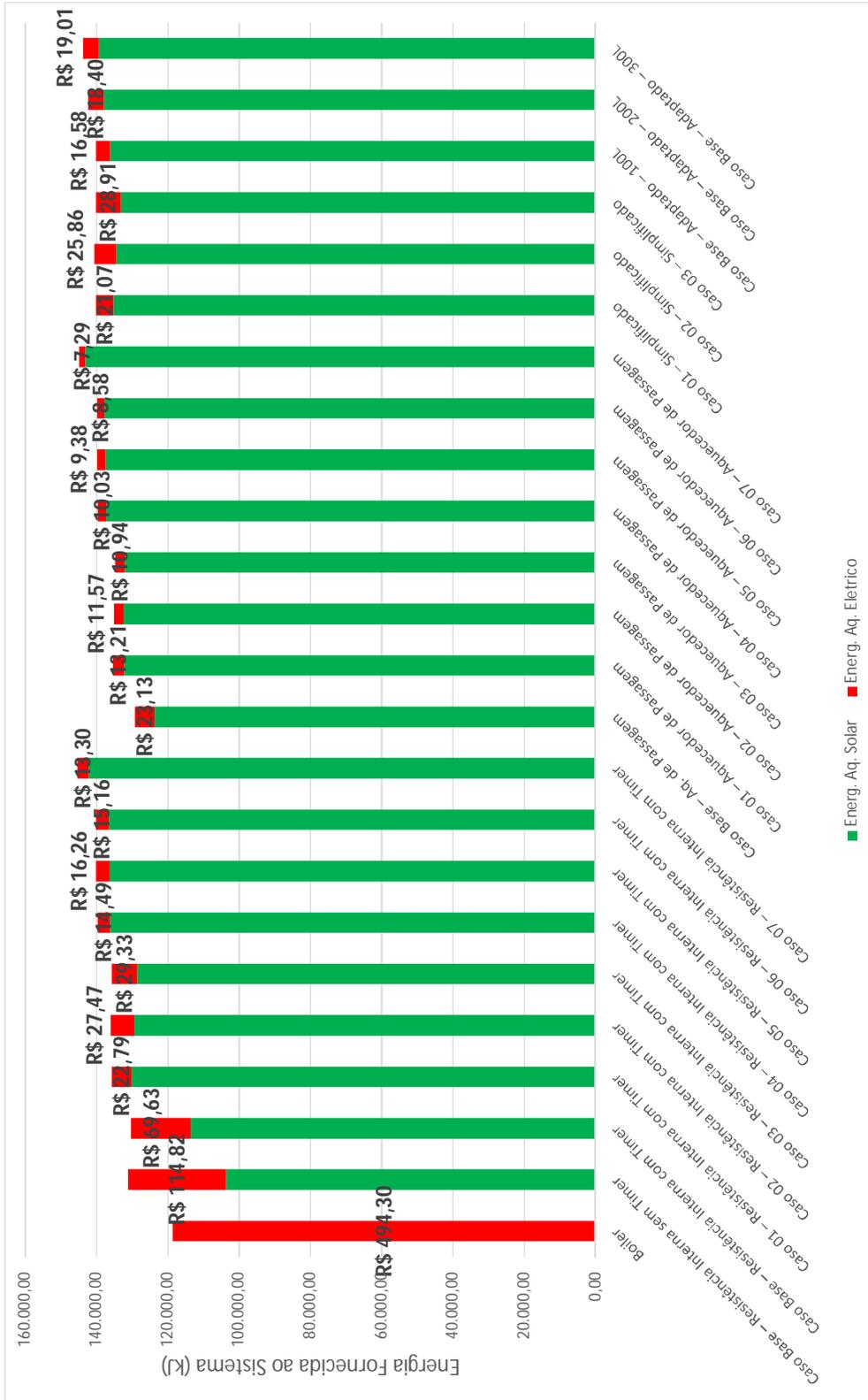


Figura 8-6 Fornecimento de Energia Solar e Elétrica com Custo Mensal de Energia Elétrica - Cenário 03 - 1.000 L

## 9. Conclusões e Sugestões

É possível concluir, pelos resultados apresentados, que embora a divisão de um tanque em dois ou mais tanques menores aumente as perdas térmicas, aumenta-se também os ganhos do coletor. Mas esses aumentos não ocorrem na mesma proporção, assim existe um número ideal de tanques onde os a proporção dos ganhos é maior que a das perdas.

Outro resultado importante verifica-se na melhora dos dados quando se usa a função timer, restringindo os horário de acionamento da resistência interna. Melhoras ainda mais significativas são observadas quando retira-se a resistência interna ao tanque para utilização do aquecedor de passagem. O aquecimento auxiliar, quando interno ao tanque, não é meramente complementar, mas é também concorrente ao aquecimento solar. Toda vez que a resistência interna fornece energia, aumenta-se a temperatura da água que passará também pelos coletores, e como já visto, uma temperatura maior reduz a eficiência dos coletores solares. Quanto maior for a injeção de energia térmica de fonte elétrica no interior do tanque, menor será a capacidade do sistema de absorver energia solar.

Por fim, é possível concluir que, nos casos em que o S.A.S. possuem dois tanques, é preferível usar a versão simplificada (versão onde apenas o tanque B está conectado aos coletores). Os resultados são praticamente iguais aos dos casos em que ambos estão conectados, sendo que as versões simplificadas, por não necessitarem de eletroválvulas para controle das conexões entre tanques e coletores, tem instalação, operação e manutenção menos complexas. Ressalta-se assim que, muito mais significativo do que aumentar a estratificação do sistema (aumentando o número de tanques) é profícuo separar a fonte solar da fonte elétrica. Seja isolando a fonte elétrica no tanque A e a solar no tanque B, ou então retirando a resistência de dentro do tanque pela utilização do aquecedor de passagem.

Os resultados sugerem assim que, no projeto de um novo S.A.S, prefira-se a utilização do aquecedor de passagem em detrimento da resistência interna. Contudo, esse equipamento necessita de instalações elétricas específicas que muitas residências não estão preparadas, uma vez que sua potência é maior que 10 kW, demandando assim altos custos de instalação. Torna-se então mais interessante o S.A.S. com dois tanques A e B, sendo A menor em volume que B e possuidor de resistência elétrica, e B sendo o único tanque conectado aos coletores. Como as resistências internas têm potência da ordem de 3 kW, geralmente a instalação elétrica do sistema é simples, barateando sua instalação.

Verificou-se também que, a fim de melhorar o desempenho de um S.A.S. já instalado, é possível adicionar um novo reservatório de menor volume entre o tanque existente e o consumo, desativando a resistência interna do tanque antigo e utilizando somente a resistência interna do novo tanque, aproveitando assim as instalações elétricas já existentes.

Estudos mais precisos poderiam ser feitos acurando-se a modelagem dos coletores solares. Poder-se-ia também analisar o impacto de diferentes arranjos de conexão entre os painéis (série, paralelo, ou mesclas de série-paralelo). Ademais, o aumento do número de tanques acarreta maior número de tubulação, que se consideradas num futuro modelo aumentariam sua precisão.

## 10. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2008. **Sistema de Aquecimento Solar de Água em Circuito Elétrico Direto: Projeto e Instalação.**

BECKMAN, W.A.; KLEIN S. A.; DUFFIE, J.A., 1977, **Solar Heating Design by the F-chart Method.** New York: John Wiley & Sons.

ALTOÉ, L.; OLIVEIRA, D.; CARLO, J. C., 2012. **Análise Energética de Sistemas Solares Térmicos para Diferentes Demandas de Água em uma Residência Unifamiliar.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA DA ELETROBRÁS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO; COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO, 2000. **Atlas Solarimétrico do Brasil.**

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.**

CLOSE, D. J., 1967. **A Design Approach for Solar Processes.** University of Wisconsin, Madison, U.S.A..

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS; GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS; AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2011 **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais.**

COOPER, P. I.; DUNKLE, R. V., 1981. **A non-Linear Flat-plane collector Model.** Solar Energy 26, 133-140.

CRUICKSHANK, C. A.; HARRISON, S. J., 2004. **Analysis of Modular Thermal Storage for Solar Systems.** Canadian Solar Buildings Conference, Montreal, Canada.

CRUICKSHANK, C. A.; HARRISON, S. J., 2005. **Experimental Evaluation of a Multi-Tank Thermal Storage Under Variable Charge Conditions.** Canadian Solar Buildings Conference, Montreal, Canada.

CRUICKSHANK, C. A.; HARRISON, S. J., 2006. **An Experimental Test Apparatus for the Evaluation of Multi-Tank Thermal Storage Systems.** Canadian Solar Buildings Conference, Montreal, Canada.

HAN, Y. M.; WANG, R. Z.; DAI, Y. J., 2009. **Thermal Stratification Within the Water Tank**. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, China.

HUSSEIN, H. M. S., 2001. **Transient Investigation of a two Phase Closed Thermosiphon Flat Plate Solar Water Heater**. Solar Energy Department, National Research Centre, Egypt.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2010. **Programa brasileiro de Etiquetagem**.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética – Edificações Residenciais – RTQ-R**.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012. **Portaria INMETRO nº 301**.

KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A., 1975. **A Design Procedure for Solar Heating Systems**. University of Wisconsin, Madison, U.S.A..

KLEINBACH, E. M.; BECKMAN, W. A.; KLEIN S. A., 1993. **Performance Study of One-Dimensional Models for Stratified Thermal Storage Tanks**. University of Wisconsin, Madison, U.S.A..

LAFAY, J. S., 2005. **Análise Energética de Sistemas de Aquecimento de Água com Energia Solar e Gás**. Tese de Doutorado, UFRGS.

LIMA, J. B. A., 2003. **Otimização de Sistema de Aquecimento Solar de Água em Edificações Residenciais Unifamiliares Utilizando o Programa TRNSYS**. Dissertação de Mestrado, USP.

MALKIN, M. P., 1985. **Design of Thermosiphon Solar Domestic Hot Water System**. University of Wisconsin, Madison, U.S.A..

MARROQUIN, A. I., 1989. **Relação Custo/Benefício Para Coletores Solares Planos e Parâmetros de Opção**. Dissertação de Mestrado, UFRGS.

MENEZES, R. C., 2008. **Análise Numérica e Experimental do Escoamento Interno em um Coletor Solar Plano**. Dissertação de Mestrado, PUC-MG.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2005. **Hourly Solar Data for Selected Stations in Brazil**.

OLIVESKI, R. C., 2000. **Análise Numérica e Experimental dos Campos de Temperatura e Velocidade em Armazenadores Térmicos**. Tese de Doutorado, UFRGS.

ORMENESE, M., 2009. **Controlador fuzzy para Otimização de Sistemas de Aquecimento de Água com Coletores Solares**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP.

POZZEBON, F. B., 2009. **Aperfeiçoamento de um Programa de Simulação Computacional para Análise de Sistemas Térmicos de Aquecimento de Água por Energia Solar**. Dissertação de Mestrado, UFRGS.

RIZZO, G., 2012. **A Model for Simulation and Optimal Design of a Solar Heating System with Seasonal Storage**. 25<sup>th</sup> International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Perugia, Italy.

SAVICKI, D. L., 2007. **Análise Numérica Tridimensional e Investigação Experimental do Comportamento Térmico e Hidrodinâmico de Reservatórios Térmicos Cilíndricos**. Tese de Doutorado, UFRGS.

SECRETARIA DE ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO; INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2013. **Levantamento do Potencial de Energia Solar Paulista**.

SIQUEIRA, A. M. O., 2003. **Desenvolvimento de um Programa de Simulação Computacional de Sistemas de Aquecimento Solar para Água**. Tese de Doutorado, UFRGS.

SOUTO, W. A., 2009. **Desenvolvimento de um Sistema Automatizado de Levantamento de Desempenho de Coletor Solar Plano**. Tese de Doutorado, UFPB.

SPENCER, J. W., 1971. **Fourier Series Representation of the Position of the Sun**. Melbourne, Victoria

TREIS, F. L., 1991. **Simulação de Sistemas de Aquecimento de Água por Energia Solar com Circulação Natural**. Dissertação de Mestrado, UFRGS.

VIEIRA, L. R., 2001. **Estratégias para Minimizar o Consumo de Energia Elétrica no Apoio a Sistemas Solares de Aquecimento de Água**. Dissertação de Mestrado, UFRGS.