

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

Luigi Antonio de Araujo Passos

**CENÁRIOS DE IMPACTOS DA ENERGIA SOLAR PARA  
AQUECIMENTO DE ÁGUA DOMÉSTICO NO CONTEXTO DE  
USUÁRIOS DE CHUVEIROS ELÉTRICOS NO BRASIL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Colle

Florianópolis

2011

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
2.1	ENERGIA SOLAR E O POTENCIAL BRASILEIRO .....	8
<b>2.1.1</b>	<b>Princípios Básicos da Geração e Distribuição de Energia .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Levantamento do Potencial Energético Solar.....</b>	<b>10</b>
2.2	SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA	
	DOMÉSTICO: UMA OPÇÃO PARA O BANHO NO BRASIL.....	16
<b>2.2.1</b>	<b>Principais Componentes e Princípio de Funcionamento .....</b>	<b>17</b>
2.2.1.1	Coletores Solares .....	17
2.2.1.2	Reservatórios Térmicos .....	17
2.2.1.3	Energia Auxiliar .....	19
<b>2.2.2</b>	<b>Tipos de Sistemas.....</b>	<b>24</b>
2.2.2.1	Sistemas Ativos .....	21
2.2.2.2	Sistemas Passivos.....	22
<b>2.2.3</b>	<b>Mercado do Aquecimento Solar de Água no Brasil.....</b>	<b>26</b>
2.2.3.1	Benefícios e Incentivos.....	25
<b>2.2.4</b>	<b>Conservação e Uso Racional da Energia Elétrica .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Simulação dos Sistemas de Aquecimento Solar para Estimativa da Economia Energia .....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ESTIMATIVA DO DESEMPENHO TÉRMICO DOS SISTEMAS SOLARES .....</b>	<b>35</b>
3.1	TRNSYS: O PROGRAMA DE SIMULAÇÃO TRANSIENTE .	35
<b>3.1.1</b>	<b>Montagem do sistema para simulação .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Modelos Matemáticos.....</b>	<b>41</b>
3.1.2.1	Radiação Solar incidente no plano inclinado.....	41
3.1.2.2	Coletor Solar com Reservatório Integrado.....	43
3.1.2.3	Misturador e Válvula Termostática .....	50
3.1.2.4	Reservatório Térmico .....	52
3.1.2.5	Chuveiro Elétrico.....	53
3.2	O ALGORITMO DE SIMULAÇÃO SIMPLIFICADO .....	53
3.3	O MÉTODO DE PROJETOS F-CHART.....	56
<b>3.3.1</b>	<b>Origem e Aplicações .....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Equações Básicas .....</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
4.1	PARÂMETROS DE ENTRADA .....	61
<b>4.1.1</b>	<b>Parâmetros Globais, Construtivos e Operacionais .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Perfil d e Consumo de Água Quente .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Dados Meteorológicos .....</b>	<b>65</b>
4.2	DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS .....	66
<b>4.2.1</b>	<b>Caso I: Aquecedor Solar + Resistência Interna .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Caso II: Aquecedor Solar + Aquecimento de Passagem.....</b>	<b>67</b>

4.2.3	<b>Caso III: Aquecedor Solar + Reservatório de Backup .....</b>	<b>68</b>
4.2.4	<b>Caso IV: Aquecedor Solar + Reservatório de Backup com</b>	
	<b>Acionamento Restrito ao horário da madrugada.....</b>	<b>69</b>
4.4	RESULTADOS .....	70
4.4	CENÁRIOS DE IMPACTOS ECONÔMICOS .....	78
4.4.1	<b>Cenário 01: Tarifa única diária e sem subsídio .....</b>	<b>79</b>
4.4.2	<b>Cenário 02: Tarifa única diária e com subsídio.....</b>	<b>84</b>
4.4.3	<b>Cenário 03: Tarifa diferenciada pelo horário de consumo e sem</b>	
	<b>subsídio .....</b>	<b>86</b>
4.4.4	<b>Cenário 04: Tarifa diferenciada pelo horário de consumo e com</b>	
	<b>subsídio .....</b>	<b>90</b>
4.4.5	<b>Cenário 05: Acionamento da Energia Auxiliar restrito ao horário</b>	
	<b>da madrugada, Tarifa diferenciada pelo horário de consumo e sem subsídio</b>	
	<b>do equipamento solar .....</b>	<b>93</b>
4.4.6	<b>Cenário 06: Acionamento da Energia Auxiliar restrito ao horário</b>	
	<b>da madrugada, Tarifa diferenciada pelo horário de consumo e com</b>	
	<b>subsídio do equipamento solar .....</b>	<b>96</b>
4.5	MAPEAMENTO DO DESEMPENHO TÉRMICO .....	98
5	<b>DISCUSSÃO E CONCLUSÕES .....</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>108</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Por decorrência dos impactos negativos das fontes convencionais de energia no meio ambiente, algumas nações têm reavaliado as suas ofertas internas de energia e procurado cada vez mais diversificá-las, gerenciando seus recursos mais nobres e aumentando a participação de fontes energéticas mais “limpas” em sua matriz energética. Neste contexto, o Brasil ainda apresenta uma matriz energética estritamente dependente da energia hidráulica, dos derivados de petróleo e dos biocombustíveis (Ministério de Minas e Energia, 2010).

A pouca diversidade da matriz energética brasileira tem efeito direto no setor elétrico nacional. Segundo o último Balanço Energético Nacional, realizado em 2010, aproximadamente 77% da geração elétrica no país provêm da energia hidráulica. Tal relatório aponta ainda que a demanda por eletricidade na oferta interna de energia vem crescendo vertiginosamente, com um aumento de 7,8% somente no último ano. Esta combinação de fatores acaba por deixar o país susceptível a novas crises energéticas semelhantes àquela de 2001, visto que as opções de geração de energia são restritas e os recursos naturalmente limitados para atender toda a demanda exigida.

No consumo final de eletricidade, o setor residencial é responsável por aproximadamente 24% de toda energia consumida no país (Ministério de Minas e Energia, 2009). Este mesmo setor apresenta ainda uma particularidade no seu perfil de distribuição do consumo diário, que é a ocorrência de um horário de pico de demanda entre as 18h e 21h (Eletrobrás, 2005). Consequentemente, toda a rede do sistema elétrico brasileiro, das usinas às instalações elétricas das residências, deve ser superdimensionada para atender à demanda de pico. Ainda assim, a rede sofre um estresse que resulta na violação dos padrões de qualidade do fornecimento da energia e na sobrecarga dos transformadores de distribuição, podendo então levar a apagões e falta setorizada de energia.

Segundo a CEMIG (1991), o principal motivo deste pico é a utilização de luzes ao início da noite e o hábito dos consumidores de banhar-se diariamente nesse horário. O consumo de energia para aquecimento de água para banho é o segundo maior em uma residência, respondendo por aproximadamente 26% do consumo total, perdendo apenas para o refrigerador que corresponde a 30% (PROCEL, 2005). Portanto, apenas o aquecimento de água para banho em residências brasileiras é responsável por mais de 6% de todo o consumo nacional de

energia elétrica, chegando a cerca 8,5% no horário de pico. Como no Brasil aproximadamente 70% das residências utilizam o chuveiro elétrico como meio de aquecimento de água para banho (Eletrobrás, 2005), este eletrodoméstico pode então ser considerado um fator agravante do pico de consumo.

O Brasil é hoje um dos raros países onde se utiliza predominantemente energia elétrica para o aquecimento de água. Segundo dados da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, o custo marginal de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (GTD) para atender a demanda dos chuveiros elétricos pode chegar a US\$ 850,00 por cada unidade instalada. Isto porque a potência total instalada para satisfazer a demanda dos chuveiros elétricos no horário de pico é da ordem de 4800 MW, um valor correspondente a cerca de 40% da potência instalada da usina hidrelétrica de Itaipu. Essa quantidade considerável de energia poderia ser armazenada nos reservatórios das hidroelétricas do país, para consumos mais nobres e também para reduzir os riscos de eventuais crises na distribuição de energia. Entretanto, uma vez que o custo marginal não é evitado, certamente este é transferido para tarifa praticada na conta de energia elétrica dos consumidores e este, sem saber, é quem paga esses investimentos.

Na tentativa de desincentivar a utilização dos chuveiros elétricos no horário de pico, uma das medidas adotadas pelas concessionárias de energia elétrica é a aplicação da chamada “sobre-tarifa”, a qual na prática se constitui uma penalidade. Por outro lado, o Ministério de Minas e Energia através do Programa PROCEL adotou a premissa de que o uso de aquecedores solares de baixo custo pudesse ser uma solução para desagregar ou amenizar o pico de demanda dos chuveiros elétricos no Brasil. Uma vez que a disponibilidade de energia solar, requerida para o funcionamento dos aquecedores solares, seja abundante em todo território nacional, e ainda, se tratando de uma tecnologia já consolidada no país, com diversos sistemas de aquecimento solar sendo fabricados e vendidos no Brasil (ABRAVA, 2002), esta premissa pode ser válida. No entanto, o pico de demanda continua sendo integralmente reproduzido sempre que condições climáticas desfavoráveis vierem a ocorrer.

Contudo, a inserção da energia solar na matriz energética brasileira depende de sua viabilidade econômica, fato este que, entre outros fatores, pode ser alcançado a partir de uma robusta cadeia de produção, baixando assim o custo de produção do equipamento. Diante disto, as leis implantadas pelas prefeituras estimulam cada vez mais o crescimento do mercado de coletores solares e incentivam a energia

solar como fonte de calor do presente e do futuro do Brasil. Atualmente existem 30 leis aprovadas em diversas cidades como São Paulo, Marília (SP), Campo Grande (MS), Vitória (ES), Niterói (RJ), entre outras, e ainda 94 projetos de leis para serem aprovados (ABRAVA, 2009). Também são crescentes as aplicações em conjuntos habitacionais e casas populares, como nos projetos Ilha do Mel, Projeto Cingapura, Projeto Sapucaias em Contagem, Conjuntos Habitacionais SIR e Maria Eugênia (COHAB) em Governador Valadares (ABRAVA, 2002).

Para atender a demanda, segundo a ABESCO - Associação Brasileira das Empresas de Conservação de Energia, entre 2007 e 2008, o mercado de aquecimento solar cresceu 35%. Com isso, atualmente o Brasil conta com aproximadamente 5 milhões de metros quadrados de coletores solares acumulados (ABRAVA, 2009). A busca pela diversificação da matriz elétrica nacional remete a um novo paradigma energético, representado pela viabilização de algumas tecnologias renováveis na medida em que se expandem. Este é o caso dos aquecedores solares no Brasil. Se não houver incentivo, o usuário fatalmente porá chuveiros elétricos e o problema apenas crescerá.

Em um estudo de escala, realizado pelo LEPTEN/LABSOLAR, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, no contexto de um projeto com recursos regulamentados pela ANEEL, os autores mostram que sistemas de aquecimento solar de água compactos de baixo custo podem reduzir a demanda de energia elétrica em no mínimo 50% (Abreu, 2004; Colle et al, 2004; Salazar, 2004). Acredita-se ainda que a efficientização da energia com a utilização de aquecedores solares é um importante fator para subsidiar, com recursos da tarifa elétrica, a aquisição dos equipamentos para consumidores de baixa e média renda (Naspolini et al, 2008). No entanto, apesar de alguns estudos restritos a uma determinada região, até o presente, nenhum trabalho foi realizado na direção de estender as projeções e avaliar o impacto dos aquecedores solares sobre a redução do pico de demanda de chuveiros elétricos em todo o território nacional.

O propósito deste trabalho é, primeiramente, configurar um modelo de sistema de aquecimento solar de água doméstico. Em seguida, utilizando o software *TRNSYS*, o método *f-chart* e um algoritmo desenvolvido no Labsolar; simular o desempenho anual do sistema, considerando diferentes opções de configuração e dimensionamento, operando em todo território brasileiro.

Feitas as estimativas do desempenho térmico do sistema, posteriormente é realizada uma simples análise econômica do sistema, considerando fatores como a efficientização da energia, a fim de mostrar

que uma grande parcela do custo de cada aquecedor solar pode ser subsidiada com recursos deslocados da atenuação de investimentos em geração, transmissão e distribuição para fazer frente ao pico de demanda acentuado pelo acionamento de chuveiros elétricos.

Por último, é feito todo um mapeamento de cenários de impactos da integração de aquecedores solares ao sistema de aquecimento de água residencial para banho na categoria de consumidores de baixa e média renda, a fim de estimar a quantidade de energia economizada e a redução no pico de demanda em toda extensão do território nacional.

Através deste estudo pretende-se documentar os resultados, de modo que se tenha um respaldo científico que auxilie na tomada de decisões para investimentos em projetos que contemplem a integração de aquecedores de água solares nos domicílios brasileiros.

Acredita-se que devam existir cenários favoráveis no contexto dos quais os ganhos com energia eficientizada e a redução dos investimentos em geração, transmissão e distribuição, decorrentes da integração de aquecedores solares e conseqüente atenuação do pico de demanda de chuveiros elétricos, possam ser utilizados para subsidiar a aquisição dos coletores pelos consumidores de média e baixa renda no Brasil. Desta forma, tanto o consumidor quanto a concessionária sairiam ganhando. O incentivo à utilização da energia solar promoveria ainda o desenvolvimento do setor industrial no país.

Para tanto, o presente trabalho é estruturado em cinco capítulos. No primeiro destes é apresentado um panorama dos principais fatos que motivaram o desenvolvimento do estudo, seguido dos objetivos que se pretende alcançar. No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica que fundamenta teoricamente o estudo. O terceiro capítulo descreve os principais aspectos da metodologia que será utilizada. O quarto capítulo apresenta todos os parâmetros e condições de operação assumidas, seguido dos resultados e análises propostas. Finalmente, o quinto e último capítulo apresenta as conclusões e comentários afins.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diante de todos os aspectos técnicos e econômicos, que estão envolvidos no aproveitamento de fontes de energia renováveis como a energia solar, procurou-se apresentar neste capítulo os tópicos de maior relevância sobre o tema abordado, fundamentando teoricamente o desenvolvimento do presente trabalho.

### 2.1 ENERGIA SOLAR E O POTENCIAL BRASILEIRO

Assim como todas os recursos energéticos presentes na natureza, a energia solar também possui uma origem bem definida: o Sol. Portanto, torna-se importante descrever brevemente os princípios básicos do processo de geração e distribuição deste tipo de energia, até que esta chegue a Terra e possa ser aproveitada de maneira prática.

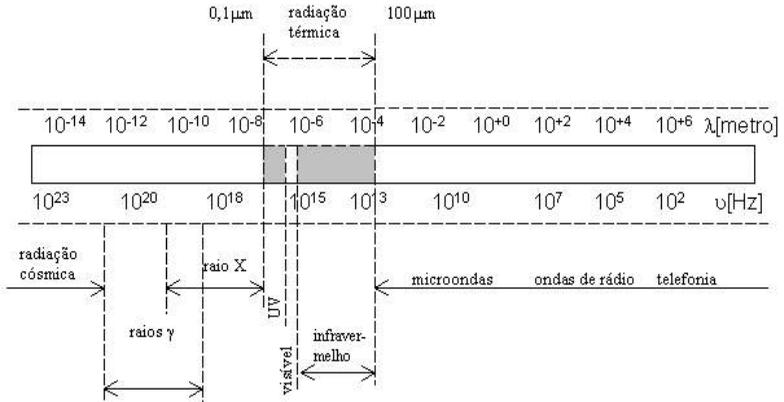
#### 2.1.1 Princípios Básicos da Geração e Distribuição de Energia Solar

A geração da energia solar tem início no núcleo do Sol, através de uma série de reações termonucleares que a cada instante vão transformando parte de sua massa em energia. A partir daí, segundo Duffie e Beckman (2003) a energia produzida no interior da esfera solar, a temperaturas de milhões de graus celsius, deve ser transferida para superfície e em seguida irradiada para o espaço. Uma sucessão de processos radioativos e convectivos ocorrem com sucessiva emissão, absorção e re-irradiação para distribuição da energia até Terra.

A grande quantidade de radiação emitida pelo Sol somada a sua relação espacial com Terra resulta em uma quantidade de radiação solar praticamente fixa fora da atmosfera terrestre. Logo, define-se como constante solar,  $G_{sc}$ , o fluxo de energia emitido pelo Sol no plano normal ao de propagação da radiação, considerando uma distância média entre a Terra e o Sol fora da atmosfera (Duffie e Beckman, 2003). Essa constante é estimada por diversos centros de pesquisa espalhados pelo mundo. O *World Radiation Center* adota um valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ , com incerteza na ordem de 1%, como sendo um valor bem próximo do real. Porém, a ABNT (1988) adotou um valor de  $1353 \text{ W/m}^2$  como referência na verificação do rendimento de equipamentos solares.

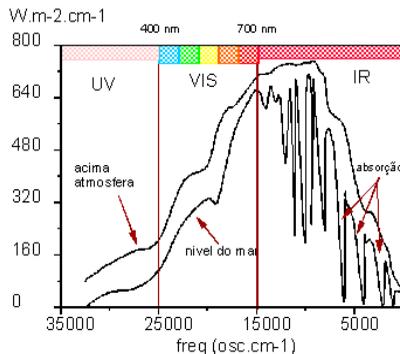
Além da constante solar, outro parâmetro de grande importância que merece ser citado é a distribuição espectral da radiação solar (Duffie e Beckman, 2003). O espectro de radiação térmica representa uma faixa do espectro eletromagnético e esta distribuído através de uma faixa de

comprimento de ondas e frequências, como mostra a figura 2.1. Entre esta, a radiação térmica é usualmente representada pela faixa do espectro compreendida entre 0,1 a 100  $\mu\text{m}$ . Essa faixa compreende a radiação infravermelha, a luz visível e ultravioleta (MENDES, 2007).



**Figura 2.1** Espectro de radiação térmica

No entanto, a quantidade de radiação solar que chega a superfície terrestre não é a mesma que a extraterrestre. Segundo Bezerra (1990), para chegar até a superfície, a radiação precisa atravessar as diversas camadas que compõem o manto atmosférico, sofrendo neste percurso interações como refração, reflexão e absorção com os componentes da atmosfera. Essas interações naturalmente atenuam o feixe de radiação que incide sobre a superfície terrestre e conseqüentemente reduz a sua potência, conforme é observado na figura 2.2.



**Figura 2.2** Atenuação do feixe de radiação que incide na superfície terrestre

Ainda assim, estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 2000).

Devido aos efeitos de absorção, reflexão e refração, sofridos pela radiação durante sua travessia pela atmosfera terrestre, nem toda radiação proveniente do sol chega na superfície da mesma forma. Neste contexto, segundo Yamasoe (2007) a radiação que atinge a superfície pode ser decomposta em dois componentes: radiação solar direta, a qual transmissão decresce com o aumento da distância zenital e particularmente quando a concentração de constituintes atmosféricos aumenta; e radiação solar difusa, que provém de todo o céu, resultante do espalhamento da radiação solar pelas moléculas de gases, partículas de aerossóis e nuvens. De acordo com o autor, a soma da radiação solar direta com a difusa é definida como radiação global.

Observa-se então que, em função das interações sofridas pela radiação durante seu transporte pela atmosfera, as condições atmosféricas é fator determinante na quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre. Entretanto, além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar, etc.), a disponibilidade de radiação solar, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve a inclinação do eixo imaginário em torno do qual a terra gira diariamente (movimento de rotação) e a trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (movimento de translação). (ANEEL, 2005). Portanto, no que se refere as aplicações práticas da energia solar, para que se tenha um planejamento energético adequado certamente a primeira análise que deve ser feita é se existe ou não disponibilidade suficiente deste recurso energético em um determinado local.

### **2.1.2 Levantamento do Potencial Energético Solar do Brasil**

Para o levantamento do potencial energético disponível, é imprescindível que se tenha informações confiáveis. Segundo Martis et al (2008), o principal obstáculo na implantação de projetos que contemplam a utilização de energias renováveis nos países em desenvolvimento é a falta de uma avaliação confiável dos recursos energéticos disponíveis. Diante do exposto, surgiram algumas iniciativas a respeito do levantamento e mapeamento dos recursos de energia solar no território brasileiro.

Segundo a ANEEL (2005), entre os esforços mais recentes e efetivos de avaliação da disponibilidade de radiação solar destaca-se o Atlas Solarimétrico do Brasil, o qual é uma iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, junto a Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF, em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRESESB; e também o Atlas de Irradiação Solar no Brasil, este elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, e pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina - LABSOLAR/UFSC.

Além dos trabalhos citados acima, destaca-se também o projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), executado no Brasil por meio de cooperação entre diversas instituições do setor energético e institutos de pesquisa nacionais e internacionais (LABSOLAR/UFSC, CEPEL, NREL, CBEE, ELETROBRÁS, NOS, etc.) sob a coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos ligado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - DMA/CPTEC/INPE, e financiamento do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA, e do Fundo Global para o Meio Ambiente - GEF (Martis et al, 2007).

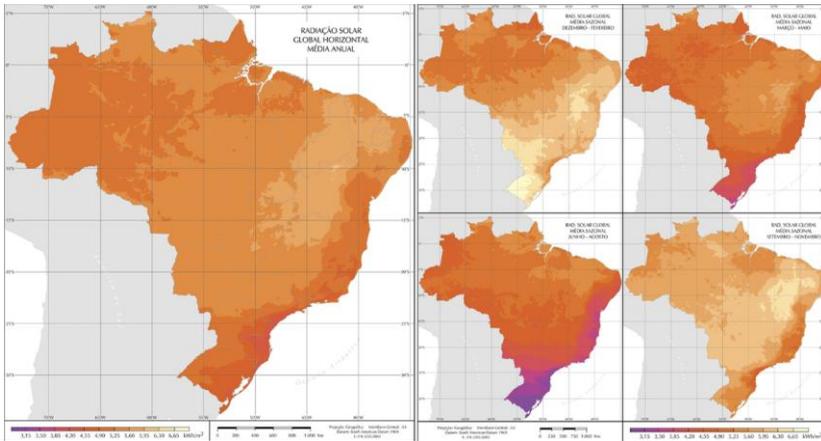
O projeto SWERA é uma medida de incentivar a introdução das energias renováveis na matriz energética dos países em desenvolvimento, a partir da geração de uma base de dados sobre energia solar e eólica integrada a dados sócio-econômicos de modo que atendessem parte da demanda de informações confiáveis necessárias para o planejamento energético e desenvolvimento de projetos para aproveitamento das fontes alternativas de energia solar e eólica (Martins et al, 2007).

Neste contexto, estão disponíveis dados de alta-qualidade, arquivados em formato GIS (geo-referenciados) e divididos em três grandes grupos regionais: África, América Latina e Ásia (Martins et al, 2008). Além destes dados, estão disponíveis também dados horários de radiação solar e outros parâmetros meteorológicos como temperatura do ar e umidade, em formato TMY (Typical Meteorological Year), para 20 cidades brasileiras. A intenção é disponibilizar esses dados para simulações computacionais de sistemas de conversão de energia solar e balanço térmico de edifícios, facilitando a comparação do desempenho de diferentes sistemas.

Dentre as informações disponíveis a respeito do recurso solar brasileiro, vale destacar aqui as médias anuais e sazonais para radiação global, difusa, direta na horizontal e direta na superfície com inclinação igual a latitude local, todas em resolução 10km x 10km, resultando na

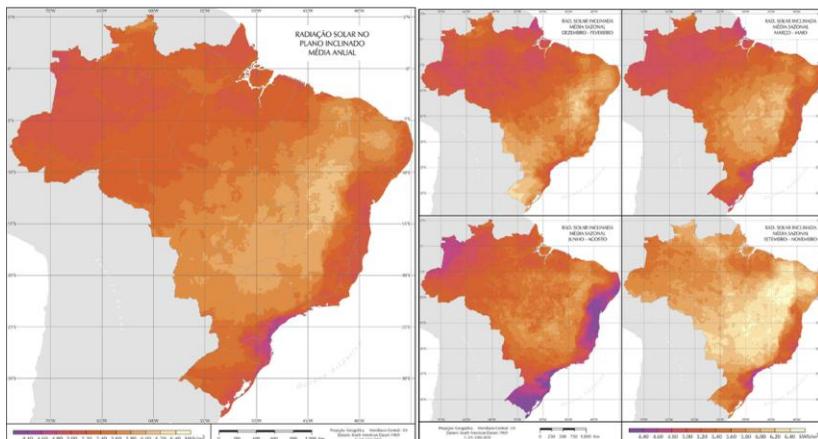
disponibilidade de mapas com alta resolução espacial. Esses mapas também fazem parte do Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado em 2007 como produto do projeto SWERA.

Segundo Pereira, Martins e Abreu (2006), a elaboração de documentos como o Atlas de energia solar é uma forma segura de apresentar o potencial energético solar brasileiro. Logo, com o intuito de levantar este potencial, é apresentado na figura 2.3 o mapas referente as médias anuais e sazonais de radiação global no plano horizontal.



**Figura 2.3** Médias Anuais e Sazonais da Radiação Global no Plano Horizontal

Apesar de que, em geral, os mapas de radiação solar disponíveis são apresentados para uma superfície horizontal, para aplicações de energia solar, onde se pode inclinar a superfície receptora, é mais conveniente observar a radiação sob um plano inclinado, com ângulo igual a latitude local (Krenzinger; Pinho, 2008). Diante disto, a figura 2.4 apresenta também as médias anuais e sazonais de radiação global no plano com inclinação igual a latitude local.



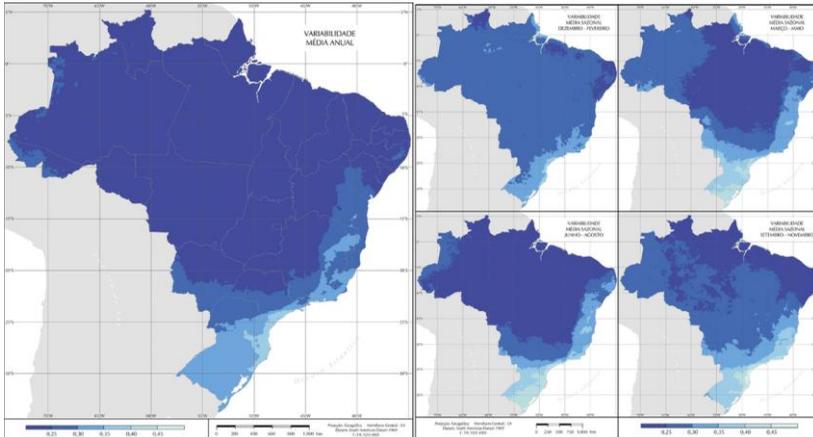
**Figura 2.4** Médias Anuais e Sazonais da Radiação Global no Plano Inclinado

Analisando as figuras, observa-se que, embora o Brasil apresente uma ampla diversidade de características climáticas em seu território, a disponibilidade de radiação solar na região é praticamente uniforme em todo território brasileiro, com a predominância de médias anuais relativamente altas em todo o país. Há diferenças significativas entre o sul e o norte, principalmente porque no sul as estações climáticas são bem definidas e os dias são mais curtos no inverno. No entanto, a radiação solar captada por mais tempo no verão compensa esta diferença na média anual. Considerando a extensão de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, a energia solar recebida no território brasileiro ultrapassa 15 milhões de TWh por ano.

Segundo o INPE (2007), os valores de radiação solar global incidentes em qualquer região do território brasileiro (4200 – 6700 Kwh/m<sup>2</sup>) são superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha (900-1250 Kwh/m<sup>2</sup>), França (900 – 1650 Kwh/m<sup>2</sup>) e Espanha (1200 – 1850 Kwh/m<sup>2</sup>), onde projetos para o aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

Além do índice de radiação solar incidente nos planos horizontal e inclinado, é importante observar ainda a variabilidade do fluxo de radiação solar incidente na superfície em torno dos valores médios apresentados nos mapas de radiação. Segundo Pereira, Martins e Abreu (2006), os valores de variabilidade média anual da radiação podem ser interpretados como a dispersão média apresentada pelos valores do total diário em torno da média obtida no período de tempo em que os dados

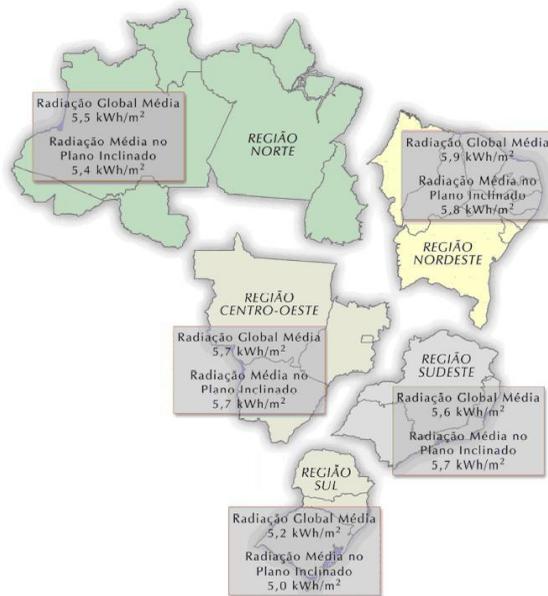
são considerados. Com isso, pode-se estimar a confiabilidade da disposição de energia na região. A figura 2.5 apresenta os valores médios de variabilidade anual.



**Figura 2.5** Média da Variabilidade Anual e Sazonal de radiação solar

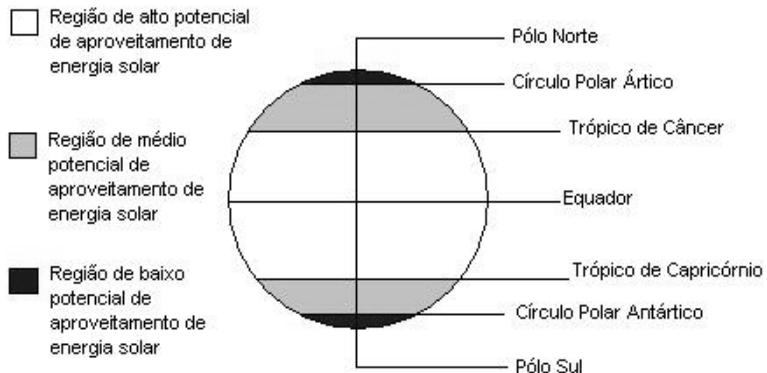
Analisando os mapas de variabilidade anual, observa-se que além de apresentar os elevados valores médios de radiação solar incidente na superfície, o território brasileiro apresenta também baixos valores de variabilidade anual da radiação. Isso indica, do ponto de vista prático, um fator positivo para a implementação de equipamentos solares nesta região.

Por fim, com a finalidade de analisar individualmente cada região do país, a figura 2.6 apresenta o potencial anual médio de energia solar por região.



**Figura 2.6** Radiação global média no plano horizontal e inclinado para cada região do Brasil

Os altos valores de radiação solar presentes no Brasil podem ser explicados pela sua posição geográfica privilegiada. Desta forma, segundo o Manual de Energia Alternativa do CEPEL (2001), o potencial de aproveitamento da energia solar de uma determinada região é determinado conforme pode ser visto na figura 2.7.



**Figura 2.7** Distribuição do potencial de Energia no Globo Terrestre

Portanto, como o Brasil encontra-se em uma região entre os trópicos e próxima à linha do Equador, privilegiando-se dos elevados índices solarimétricos que são determinantes para o crescente aproveitamento do aquecimento solar, a figura 2.8 mostra que o Brasil possui grande parte de seu território (cerca de 90%) na região considerada de alto potencial de energia solar.



**Figura 2.8** Potencial de Energia Solar do Brasil

Diante do exposto, torna-se evidente que o Brasil apresenta um dos maiores potenciais solares do mundo. Deste modo, espera-se que os dados auxiliem no desenvolvimento de projetos contemplem sistemas de conversão termo-solar no Brasil.

## 2.2 SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA DOMÉSTICO: UMA OPÇÃO PARA O BANHO NO BRASIL

Os Sistemas de Aquecimento Solar de Água Doméstico (SASAD) são sem dúvida a aplicação térmica da energia solar que mais tem sido utilizada nas habitações do Brasil. O elevado potencial energético solar brasileiro e a consolidação desta tecnologia no país são alguns dos fatores que tem incentivado bastante sua disseminação, tornando-os um importante aliado para economia de energia. Contudo, ainda existem barreiras dificultando a sua total popularização.

Neste capítulo será apresentado uma descrição dos principais componentes, configurações, tipos de sistemas e outras considerações importantes a respeito dos SASAD.

## **2.2.1 Principais Componentes e Princípio de Funcionamento**

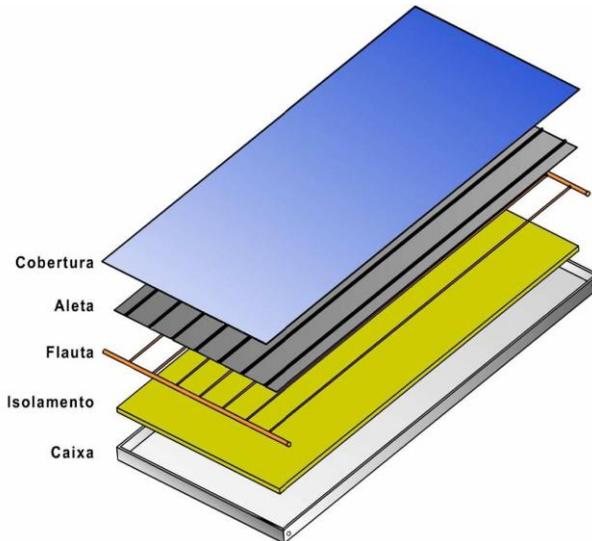
Basicamente os sistemas de aquecimento solar de água doméstico são compostos por coletores solares, reservatórios térmicos e uma fonte de energia auxiliar.

### *2.2.1.1 Coletores Solares*

O coletor solar pode ser considerado o principal componente de um sistema de aquecimento solar, de modo que este possui a função de captar a radiação emitida pelo Sol e transmiti-la para um fluido de trabalho sob a forma de calor utilizável, aumentando a sua energia interna.

Primordialmente, os coletores podem ser classificados em três tipos principais: concentradores, planos e tubo-evacuados. No entanto, para o aquecimento de água para com fins domésticos, onde as temperaturas a serem atingidas são relativamente baixas, os coletores planos apresentam algumas vantagens em relação aos outros tipos, que são: a simplicidade de construção, relativo baixo custo, nenhuma parte móvel, sem dificuldade de operar em dias nublados, relativa facilidade de reparo e durabilidade (LIMA, 2003). Diante disto, os aquecedores solares planos são largamente mais utilizados nos SASAD. Portanto, sob a perspectiva do presente trabalho, será apresentado apenas os coletores planos.

Há dois tipos de coletores solares planos: abertos e fechados. O coletor solar plano convencional utilizado para banho no Brasil é fechado. Este coletor é composto por uma caixa externa, um material isolante térmico, a flauta, as aletas e uma cobertura transparente. A figura 2.9 ilustra a sua composição. Os coletores abertos são geralmente utilizados no aquecimento de piscinas e a diferença para o coletor fechado é basicamente a inexistência da caixa, cobertura e isolamento.



**Figura 2.9** Composição Estrutural do Coletor Solar

A montagem do coletor tem início com a caixa externa, a qual geralmente é feita de alumínio e suporta todo o conjunto.

Em seguida tem-se o isolamento térmico, revestindo a caixa externa com objetivo de minimizar as perdas térmicas para o ambiente externo. É recomendável que o material do isolamento seja capaz de resistir a temperaturas de até 204 °C sem produzir substâncias voláteis (ASHRAE, 1996). Os materiais mais utilizados para sua fabricação geralmente são lã de vidro, lã de rocha ou espuma de poliuretano.

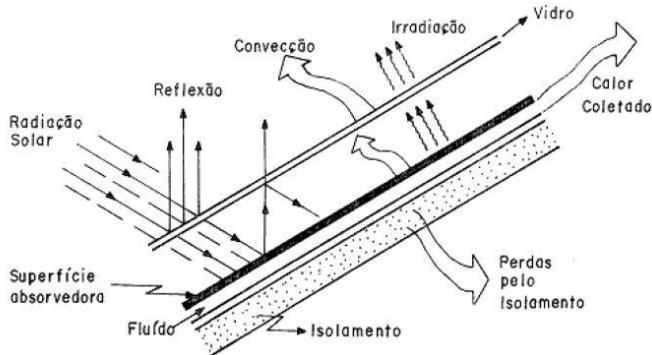
A flauta, que também pode ser chamada de calhas superior e inferior, é um conjunto de tubos interconectados através dos quais o fluido escoar no interior do coletor. São construídas com metais de alta condutividade térmica, geralmente cobre.

As aletas são a placa absorvedora. É delas a função de absorção e transferência da energia solar para o fluido de trabalho. Assim como a flauta, também são construídas com metais de alta condutividade térmica, geralmente cobre, alumínio ou aço. Esses metais são pintados de preto fosco ou recebem tratamento especial para melhorar a absorção. Segundo Hudson e Markell (1985) as cores escuras podem absorver até 95% da energia disponível, no entanto, ao mesmo tempo em que são boas absorvedoras, são também excelentes irradiadoras de energia.

Por fim, a cobertura transparente promove o efeito estufa no equipamento, permitindo a transmissão da radiação solar para as aletas e

simultaneamente reduzindo as suas perdas convectivas e radiativas para o ambiente externo. São construídas de vidro, policarbonato ou acrílico, sendo o vidro o mais utilizado. Alguns coletores possuem duas ou mais coberturas para aumentar a redução das perdas.

Diante do exposto, a figura 2.10 ilustra os princípios de transferência de calor que ocorrem no coletor em funcionamento.



**Figura 2.10** Mecanismos de Transferência de no Coletor Solar

Assim, uma vez que os processos de transferência de calor no equipamento são conhecidos, assumindo que  $Q_u$  é o ganho útil de energia,  $A_c$  a área do coletor,  $S$  a radiação solar absorvida,  $U_L$  o coeficiente global de transferência de calor,  $T_{pm}$  a temperatura média da placa e  $T_a$  a temperatura ambiente, obtem-se através de um simples balanço de energia a equação básica para calcular a taxa de ganho útil de energia no coletor:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2.1)$$

No entanto, segundo Duffie e Beckman (2003), em decorrência da dificuldade em se calcular ou medir a temperatura média da placa absorvedora, a equação 2.1 é reformulada de modo que o ganho útil de energia no coletor possa ser calculado em função da temperatura de entrada do fluido, ao invés da temperatura média da placa.

Para isto é definido um parâmetro chamado fator de remoção de calor do coletor,  $F_R$ , o qual pode ser estimado analiticamente ou

medido experimentalmente. Na prática este fator equivale a efetividade de um trocador de calor convencional, visto que este é definido como a razão entre a energia transferida para o fluido sobre a energia que chega ao coletor solar (Duffie e Beckman, 2006).

Logo, fazendo uso desse fator,  $T_{pm}$  é substituído por  $T_i$  na equação 2.1 e multiplica-se o lado direito da mesma equação por  $F_R$ . Desta forma, a taxa de ganho útil no coletor passa a ser facilmente calculada através da equação 2.2.

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (2.2)$$

A eficiência térmica do coletor é então definida como a razão entre ganho útil de energia sob um determinado período de tempo pela energia que chega ao coletor neste mesmo período, podendo ser calculada pela equação 2.3.

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (2.3)$$

A eficiência do coletor vai depender dos materiais empregados na sua construção e do seu design. Muitas vezes é desejável construir um equipamento com a eficiência menor do que sua capacidade tecnológica permitiria. A relação custo-desempenho deve ser avaliada como fator determinante para cada caso em particular. Neste contexto, atualmente há no Brasil um programa de etiquetagem PROCEL, semelhante àquele dos refrigeradores, que caracteriza os coletores em função de sua eficiência.

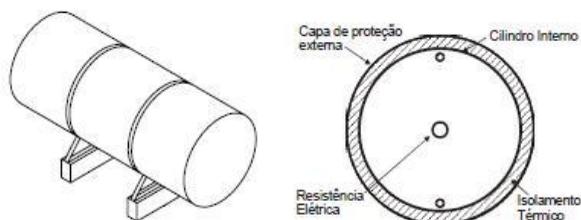
Além dos coletores, outro componente de extrema importância nos SASAD são os reservatórios térmicos. Estes serão abordados no sub-capítulo seguinte.

### 2.2.1.2 Reservatórios Térmicos

Sob a perspectiva de um sistema de aquecimento solar de água doméstico o reservatório térmico deve ser considerado componente essencial para um funcionamento adequado. Como a disponibilidade da energia solar é um recurso dependente do tempo, o reservatório térmico

assume a função de armazenar a água quente proveniente do coletor, acumulando esta energia de modo que fique disponível ao usuário por um maior período de tempo, inclusive aqueles em que não há insolação disponível (Duffie e Beckamn, 2006). Em outras palavras o reservatório aumenta a flexibilidade do horário de utilização da água aquecida

Um bom reservatório deve suportar temperaturas elevadas, suportar as pressões envolvidas em seu interior e ainda ser resistente a corrosão (COSTA). A sua composição consiste basicamente de um cilindro interno, material isolamento térmico, uma capa de proteção externa e em alguns casos, uma resistência elétrica. A figura 2.11 ilustra a disposição desses elementos.



**Figura 2.11** Composição do Reservatório Térmico

O cilindro interno é a peça que fica em contato direto com a água. Para sua fabricação utilizasse preferencialmente o aço inoxidável. No entanto cobre ou aço esmaltado com ânodo de proteção também pode ser utilizado.

Entre o cilindro interno e o corpo externo fica instalado o isolamento térmico. A espessura e o material de fabricação são fatores determinantes na conservação da temperatura, afim de se evitar perdas para o ambiente externo. Normalmente o material utilizado é lã de vidro ou espuma de poliuretano e a espessura algo em torno de 50 mm.

Por fim a capa de proteção externa protege o isolamento térmico de intempéries, aumentando a vida útil do equipamento. Normalmente é fabricada de alumínio, aço galvanizado ou aço carbono pintado.

No caso da resistência elétrica, esta é item opcional de alguns reservatórios e será descrita no item seguinte, o qual refere-se a energia auxiliar dos sistemas de aquecimento solar de água doméstico.

Visto a composição dos reservatórios térmico, é importante ressaltar que apesar de bem definidos na literatura, segundo a ASHAE, o projeto e seleção dos materiais de fabricação dos reservatórios térmicos

ainda é um dos itens mais negligenciados nos sistemas de aquecimento solar.

No que se refere a operação do reservatório, o armazenamento de água quente nos tanques pode apresentar um perfil de estratificação significativa, ou seja, a temperatura no topo mais elevada que a temperatura no fundo. Petrucci (1998) explica que este fenômeno ocorre em decorrência da variação do peso específico da água em função da temperatura. Desta forma, a água que entra no tanque em temperatura mais baixa que aquela que se encontra em seu interior tende a se posicionar abaixo desta. Diante disto, os reservatórios normalmente são projetados de modo que a água aquecida seja fornecida na parte superior do tanque a medida que a água fria é fornecida na parte inferior.

Segundo Duffie e Beckman (2006), no âmbito de simular o efeito da estratificação do reservatório, muitos modelos já foram desenvolvidos, entretanto, eles quase sempre se encaixam em duas grandes categorias: múltiplos nós e *plug flow*. Cada um deles tem suas particularidades, de modo que a escolha de qual modelo utilizar vai depender estritamente das condições práticas em que o reservatório está sujeito. Nos casos em que tem-se um grau de estratificação um pouco mais elevado, o modelo *plug flow* é mais representativo (TRNSYS, 2005).

Por fim, um aspecto pertinente quando se pretende avaliar o comportamento do resfriamento do reservatório térmico no decorrer do tempo é a respeito da determinação do coeficiente global de perdas térmicas,  $UA$ . O fato de existir muitas conexões de cobre na parte superior e inferior do reservatório dificultam a determinação de um coeficiente teórico. Neste contexto, autores como Lourenço (2000) e Salazar (2004) realizaram experimentos avaliando a curva de resfriamento dos reservatórios térmicos e estimando experimentalmente o coeficiente global de transferência de calor. Contudo, Oliveski (2000) e Colle (2001) mostraram que é possível obter resultado similar calculando o coeficiente teoricamente.

### 2.2.1.3 Energia Auxiliar

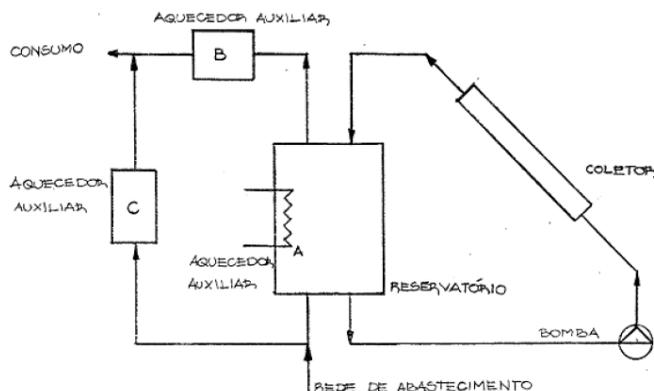
O nome “energia auxiliar” por si próprio já seria auto-explicativo. Contudo, descrevendo-se minuciosamente, trata-se de uma fonte energética não-solar que auxilie a manutenção da temperatura de trabalho imposta no SASAD. Segundo Duffie e Beckman (2006), a combinação de um coletor solar bem dimensionado, um reservatório de

armazenamento térmico e uma fonte de energia auxiliar fornecem o grau de confiabilidade desejado para o sistema.

Certamente em algumas regiões mais quentes e com pouca cobertura de nuvens toda demanda do sistema pudesse ser suprida praticamente sem fazer uso da energia auxiliar. No entanto, nas demais regiões, para não utilizar a energia auxiliar seria necessário superdimensionar todo o sistema, tornando-o economicamente inviável. Por esse motivo, um SASAD é projetado para que cerca de 30% da demanda de água quente de uma residência seja suprida por uma fonte de energia auxiliar (Fish; Guigas; Dalenback; 1998).

As fontes energéticas tradicionalmente utilizadas como auxiliar são a elétrica, gás ou bomba de calor. Contudo, na grande maioria das vezes é utilizada energia elétrica devido a sua facilidade de aquisição e custo operacional (POZZEBON, 2009). Portanto, sob a ótica deste trabalho, apenas a fonte elétrica será considerada como energia auxiliar.

Para que a energia elétrica seja utilizada como energia auxiliar é simples, basta instalar uma resistência em determinado ponto do sistema. No que se refere a localização deste ponto no SASAD, Duffie e Beckman (2006) apontam três diferentes opções de instalação conforme é ilustrado na figura 2.12 e descrito nos próximos parágrafos.



**Figura 2.12** Opções de Localização da Energia Auxiliar no Sistema

Na opção A, a resistência é instalada no interior do reservatório térmico, sendo acionada através de um termostato em função de uma temperatura de trabalho desejada neste local. Segundo Treis (1991) é a opção mais utilizada no Brasil.

Já na opção B, a resistência elétrica é instalada no exterior do reservatório, funcionando em série com este, aproveitando assim toda

energia acumulada em seu interior e fornecendo apenas a quantidade necessária para atingir a temperatura pré-determinada próximo ao ponto de consumo.

Por fim, a opção C, onde a resistência elétrica também é instalada no exterior do reservatório, porém, diferentemente da opção B, a resistência é instalada em paralelo com o reservatório térmico, aquecendo diretamente a água que vem da rede quando a temperatura acumulada no reservatório for insuficiente para atender as condições pré-determinadas.

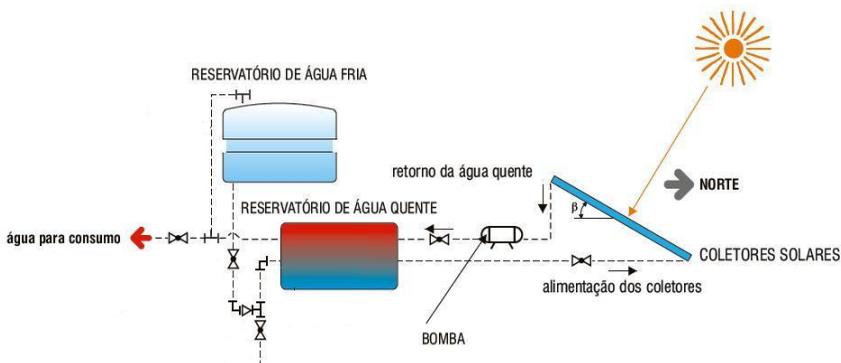
Não há como generalizar qual dos três locais de instalação da resistência elétrica no SASAD irá proporcionar um melhor aproveitamento do sistema. Portanto, o local para introdução da resistência elétrica que proporcione um melhor desempenho do sistema deve ser avaliado em função das condições operacionais do sistema (POZZEBON, 2009).

## **2.2.2 Tipos de Sistemas**

Os componentes do sistema de aquecimento solar de água doméstico, conforme apresentado no item anterior, podem ser instalados utilizando-se diferentes tipos de configurações. Deste modo, cada configuração utilizada apresentará um respectivo princípio operacional quanto ao modo de circulação de água quente. Neste contexto, os SASAD podem ser classificados como sistemas ativos ou como sistemas passivos, como será apresentado nos sub-itens seguintes.

### *2.2.2.1 Sistemas Ativos*

Os SASAD podem ser classificados como um sistema ativo quando a circulação de água entre o coletor e o reservatório for forçada. Nesta situação torna-se indispensável a utilização de uma bomba de água localizada entre estes dois componentes para criar o gradiente de pressão. Portanto, uma vez que a bomba esteja impondo um fluxo de circulação de água constante, não há qualquer restrição quanto ao posicionamento do reservatório em relação aos coletores. A figura 2.13 ilustra a configuração mais utilizada dos SASAD classificados como sistemas ativos.



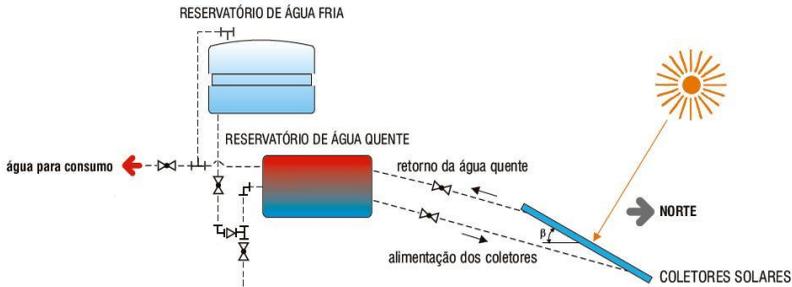
**Figura 2.13** Ilustração da configuração de um sistema ativo

Nesta configuração a circulação de água dependerá estritamente do acionamento da bomba. Por sua vez, a bomba é acionada através da utilização de um controlador diferencial. O dispositivo citado é um controlador automático que utiliza termostatos conectados no fundo do tanque e na saída dos coletores solares para reportar ambas temperaturas, de modo que a bomba seja acionada somente quando houver um diferencial de temperatura pré-estabelecido entre estes. Portanto, quando este diferencial de temperatura torna-se menor que o estabelecido ou quando a temperatura do reservatório atingir uma temperatura desejada, a bomba é então desligada.

O sistema ativo, em relação ao passivo, ganha uma flexibilidade quando a localização do reservatório e dos coletores. Entretanto, em alguns casos, os custos podem aumentar significativamente, uma vez que torna-se necessário a utilização de outros dispositivos como bomba e os controladores eletrônicos (Juliana).

### 2.2.2.3 Sistemas Passivos

Por outro lado, os SASAD podem ser classificados como um sistema passivo quando a circulação de água entre o coletor e o reservatório for exclusivamente natural. Nesta situação, não há necessidade da utilização de bombas entre o reservatório e o coletor solar. Entretanto, a condição essencial para que ocorra a circulação é que o reservatório térmico seja posicionado acima dos coletores solares. A figura 2.14 ilustra a configuração mais utilizada dos SASAD classificados como sistemas passivos.



**Figura 2.14** Ilustração da configuração de um sistema passivo

Nesta configuração a circulação da água ocorre somente em decorrência da diferença de temperatura entre a água no coletor solar e a no reservatório térmico. Esta diferença de temperatura estabelece uma diferença de densidade na água, que por sua vez promove o gradiente de pressão necessário para causar o movimento. Portanto, pode-se concluir que o fluxo de água circulando vai depender estritamente do ganho útil no coletor, o qual produz o gradiente de temperatura. Este fenômeno de circulação natural é também conhecido como termosifão.

Devido ao simples princípio funcionamento e a boa adaptação aos climas tropicais, o sistema passivo é o mais utilizado nos SASAD do Brasil (POZZEBON, 2007). Além disso, outra vantagem apresentada por este sistema em relação ao sistema ativo é o fato de não haver necessidade de adquirir dispositivos e custos adicionais relacionados ao funcionamento da bomba.

### 2.2.3 Mercado do Aquecimento de Água Solar no Brasil

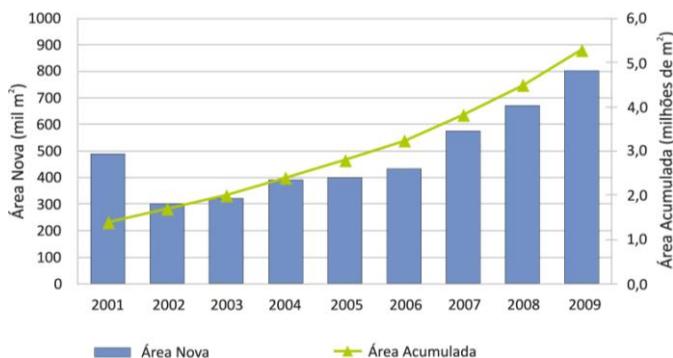
Embora o aquecimento solar no Brasil tenha se iniciado comercialmente na década de 70, somente a partir dos anos 90 é que o mercado começou a obter um aumento nas taxas de crescimento (BAPTISTA, 2006). Contudo, foi a partir do ano 2001 e a marcante crise de energia elétrica que o mercado brasileiro de aquecimento solar passou por uma mudança expressiva.

Diante da crise de energia elétrica sofrida pelo Brasil em 2001, impulsionada por diversas medidas e metas de redução de consumo de energia adotadas pelo Governo, a resposta no mercado de aquecimento

solar foi imediata, disparando um crescimento de 80% em relação ao ano anterior. Na ocasião, motivadas pelo cenário incentivador, novas empresas foram surgindo e as que já estavam no mercado precisaram investir para atender a demanda. Durante este período o aquecimento solar no Brasil foi amplamente divulgado (FARIA, 2004).

Porém, passado o período da crise, o mercado sofreu uma forte retração apresentando em 2002 uma queda acentuada em relação ao ano de 2001. A mudança repentina teve então conseqüências bruscas, causando o fechamento da maioria das empresas ou forçando-as a encerrar as atividades relacionadas à tecnologia solar, denunciando assim a fragilidade da infra-estrutura para o desenvolvimento de uma política regulamentadora para a tecnologia solar (FARIA, 2004).

No entanto, a partir de 2002, o mercado pareceu ter retomado a direção. O Brasil então passou a instalar uma média de 320 mil m<sup>2</sup> por ano apresentando entre 2002 e 2004 um crescimento de mercado de 33% (BAPTISTA, 2006). A tendência de crescimento se manteve inabalável até o momento, conforme é apresentado na figura 2.15.



**Figura 2.15** Crescimento do Mercado de Coletores Solares nos últimos 10 anos

A figura apresentada resume todo o desenvolvimento do mercado de aquecimento solar durante a década passada e aponta que o mercado para expansão ainda é muito grande. Segundo pesquisa realizada pela DASOL (2009), somente no ano de 2009 a produção brasileira de coletores solares cresceu 18,9% em relação ao ano anterior. Ainda de acordo com o autor, na época foi atingido um volume de 798 mil metros quadrados, o maior já registrado pelo setor nos últimos anos. Somando este volume com o já instalado, o Brasil hoje acumula mais de 5 milhões de metros quadrados de coletores solares.

Diante do exposto, observa-se que o atual cenário de desenvolvimento do mercado de aquecimento solar no Brasil é motivador. Com isso, hoje o Brasil domina a tecnologia de aquecedores solares, sendo que 100% dos equipamentos utilizados são produzidos no país, com mão-de-obra e matérias-primas nacionais (MAZZON e MESQUITA, 2004).

#### *2.2.2.4 Benefícios e Incentivos*

A introdução dos sistemas de aquecimento solar de água doméstico nas residências do Brasil tem sido associada a um conjunto de benefícios e, por conseguinte se mostrado uma idéia altamente promissora. Dentre os argumentos mais citados, destaca-se a redução do uso do chuveiro elétrico que, no horário de pico, é um dos grandes responsáveis pelo alto consumo da energia elétrica no país, exigindo altos investimentos das distribuidoras para suprir essa demanda, como já foi reportado em vários trabalhos. Entretanto, há também outros benefícios em nível nacional que merecem ser citados.

Segundo dados da DASOL, para cada metro quadrado de coletor solar instalado e utilizado durante um ano no Brasil, há um equivalente de:

- 56 metros quadrados de áreas inundadas (hidrelétricas);
- 215 quilos de lenha;
- 66 litros de diesel;
- 55 quilos de gás.

Além dos dados expostos, torna-se importante também citar os benefícios atingidos sob a ótica de cada residência em particular. Para tanto, ainda serão utilizados dados da DASOL. Segundo o autor citado, com a introdução dos SASAD, há uma economia de até 50% na conta de energia elétrica. Desta forma, estima-se que todo o investimento inicial, o qual possui uma vida útil de 15 a 20 anos em média, seja retornado em um prazo de 0 a 24 meses, tornando assim a sua utilização algo muito vantajoso.

Diante do exposto, o governo federal tem tentado incentivar a utilização dos SASAD. Como medida tomada, diversos projetos habitacionais de interesse social como o Cohab's, CDHU, Minha Casa, Minha Vida contemplam o sistema instalado. Outra medida foi a criação em 2002 do Programa Nacional de Instalação de coletores solares (PROSOL), o qual tinha por objetivo aproveitar a energia solar e criar um fundo (FUNSOL) que garantisse o financiamento da instalação de

coletores solares em imóveis comerciais e residenciais de todo país (BAPTISTA, 2006).

Por outro lado, os governos municipais têm apresentado alguns esforços recentes e efetivos. Desde 2006 diversas leis estão sendo criadas e muitas ainda estão em tramitação, colaborando para ampliação do setor e conseqüente produção em escala dos equipamentos, fato este que está estreitamente relacionado à redução dos preços (DASOL, 2008).

É importante ressaltar também algumas iniciativas como o programa “Aquecimento de Água com Energia Solar”, implementado pela CEMIG (Centrais Elétricas de Minas Gerais), onde instalações de coletores solares eram doadas visando melhorar o serviço elétrico nos bairros beneficiados; e o projeto “Cidades Solares” promovido pela DASOL e Vitae Civilis, o qual procura demonstrar aos poderes públicos a necessidade da criação de leis de incentivo ao uso de aquecedores solares (KREZNIGER e PINHO, 2008).

No entanto, apesar de todos os benefícios e incentivos, ao contrário do que vem ocorrendo em outros países, ainda não existem incentivos fiscais e financeiros para os usuários desta tecnologia no Brasil (BAPTISTA, 2006). Segundo Krazenge (2008), a maior conquista até o momento foi uma lei que tornou obrigatório o uso de aquecedores solares em algumas das novas edificações comerciais, residenciais e industriais da cidade de São Paulo.

## **2.3 Conservação e Uso Racional da Energia Elétrica**

Uma década se passou desde a crise de energia elétrica vivida pelo Brasil em 2001 e o conceito de conservação e uso racional desta energia ainda luta para se firmar no planejamento energético do país. Conservar energia elétrica quer dizer melhorar a maneira de utilização desta energia, sem abrir mão do conforto e das vantagens que ela proporciona (SALES, 2008). Em outras palavras, conservar a energia elétrica significa reduzir o seu consumo sem comprometer em momento algum a eficiência e a qualidade dos seus serviços.

No setor residencial o consumo de energia pode ser traduzido pela utilização de eletrodomésticos, ou seja, equipamentos eletrônicos de uso doméstico que necessitam de energia elétrica para o seu funcionamento, como: lâmpadas, televisores, refrigeradores, chuveiros, etc. Cada um desses equipamentos em particular apresenta uma potência de consumo específica, podendo haver variação desta em função da

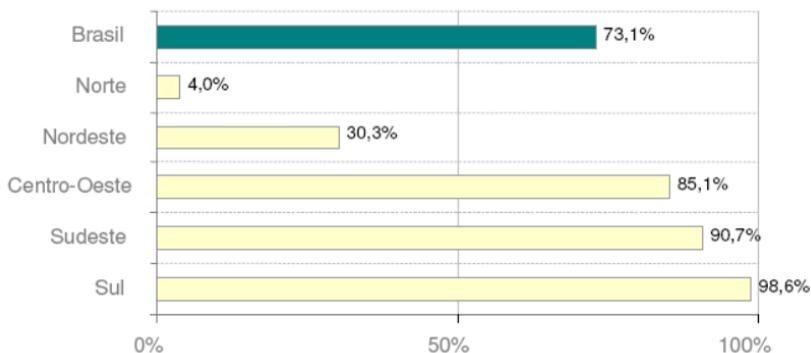
marca, qualidade ou modelo, que corresponde a uma parcela da demanda total de energia elétrica consumida em uma residência (PROCEL, 2005).

No âmbito de estabelecer uma política pública para o setor energético nacional, capacitada em controlar a demanda de energia do setor residencial, surgiu no Brasil em dezembro de 1985 o programa de conservação de energia com maior expressão no país: PROCEL (Programa ao Combate de Desperdício de Energia Elétrica). Dentre as principais ações do programa estão projetos na área de uso final (refrigeradores e freezers, sistemas de motores, iluminação, educação, prêmio PROCEL e o selo de eficiência energética), projetos de redução de perdas na oferta de energia e projetos de geração adicional de energia elétrica (SALAZAR, 2004). Segundo Furlanetto (1999), o PROCEL incentiva uma melhora da eficiência energética dos eletrodomésticos e também ajuda os consumidores a escolher os equipamentos mais econômicos.

Na medida em que o PROCEL esteja cumprindo com o seu papel de caracterizar tecnicamente os eletrodomésticos, e por sua vez estas informações estejam bem acessíveis ao consumidor, resta então a este cumprir com o seu também através de escolhas mais conscientes, no que refere aos princípios de conservação e uso racional de energia. No entanto, Sales (2008) alerta que as principais características que os consumidores procuram nestes equipamentos são: durabilidade, fabricante e preço, sem preocupação notável com o consumo. Fatos como este demonstram a negligência de boa parte dos consumidores brasileiros.

Neste contexto, dentre os eletrodomésticos de elevado consumo preferido dos consumidores brasileiros destaca-se os chuveiros elétricos. Estes equipamentos utilizam uma potência que geralmente está entre 2,0 e 8,0 kW. É certamente o equipamento mais potente de uma residência, respondendo por cerca de 25,0 % do consumo total de uma residência.

No que se refere a sua penetrabilidade nas residências, a figura 2.16 apresenta o índice de domicílios no Brasil, que possuem pelo menos um desses equipamentos instalado.

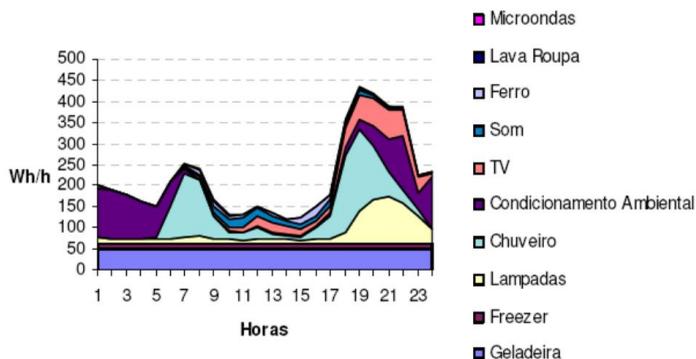


**Figura 2.16** Índice de domicílios no Brasil que possuem pelo menos um chuveiro elétrico instalado

Apesar de pouco significativa na região Norte e razoavelmente baixa na região Nordeste, nota-se que de um modo geral a penetrabilidade dos chuveiros elétricos nos domicílios do Brasil ainda é muito elevada, sobretudo na região Sul do país.

Uma vez que os chuveiros elétricos estão presentes nas residências, estes apresentam uma característica bastante marcante quanto ao seu período de utilização que é a predominância de seu uso sempre nos horários de ponta.

Neste contexto, uma pesquisa de posse de eletrodomésticos e hábitos de consumo, realizada em 2005 pela ELETROBRAS PROCEL, fez o levantamento da curva de demanda padrão para os domicílios do Brasil, em um dia típico, mostrando assim a distribuição temporal do consumo energético de cada eletrodoméstico. A curva citada é apresentada na 2.17.



Analisando a figura acima percebe-se claramente que o uso do chuveiro elétrico responde por uma parcela significativa do pico de consumo na curva de demanda de energia elétrica padrão dos domicílios brasileiros.

Diante do que foi exposto, torna-se evidente que a redução na utilização dos chuveiros não somente representaria uma economia no total de energia consumido como também uma redução acentuada no pico de demanda. Segundo Oliva e Borges (1996), as características de consumo destes equipamentos como, a elevada potência, o baixo fator de carga, e o seu uso sempre no horário de ponta torna-os impróprios para qualquer sistema elétrico.

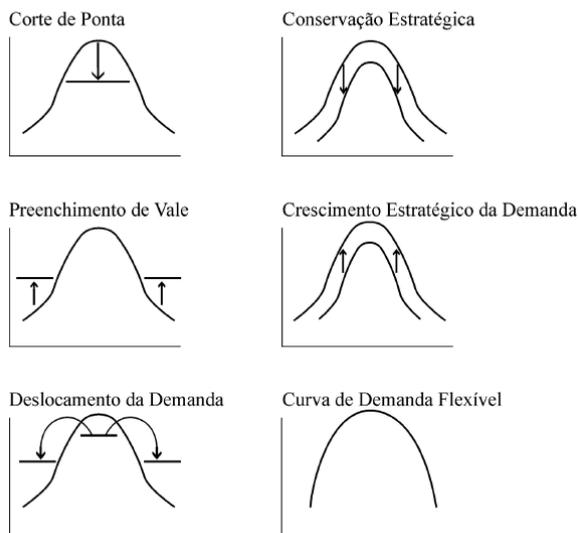
Apesar de tudo, não há um programa nacional para substituição ou redução do uso dos chuveiros elétricos no Brasil (KREZNINGER e PINHO, 2008). Ao invés disto, o número destes equipamentos instalados nos últimos anos tem crescido bastante, assim como também vem acontecendo com a sua potência, fatos estes que contrariam totalmente os princípios da conservação e uso racional de energia. Políticas de conservação de energia devem procurar reduzir o consumo energético dos aparelhos eletrodomésticos, assim como a contribuição destes no pico de demanda da curva de carga (JANNUZZI; SCHIPPER, 1991).

No âmbito de conservar a energia elétrica e promover o seu uso racional, através da redução da utilização dos chuveiros elétricos e conseqüente redução no pico de demanda, a instalação dos sistemas de aquecimento solar de água doméstico nos domicílios pode ser considerada uma opção adequada. No entanto, uma vez que os preços de aquisição e instalação de um SASAD são bem superiores aos de um chuveiro elétrico, fato este que dificultaria a difusão do sistema nos domicílios, uma boa saída para conseguir isto seria adotando o investimento nos SASAD como uma ação de Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD).

O Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) pode ser definido como qualquer iniciativa por parte da concessionária, com cooperação e consentimento do consumidor, que promova uma operação mais eficiente no serviço de energia elétrica através do controle de carga pelo lado do consumidor (COSTA ET AL, 2007; SALAZAR, 2004). Em outras palavras são ações implementadas diretamente ou estimuladas indiretamente pela concessionária de energia, com o intuito de modificar e racionalizar a forma com que a energia elétrica é utilizada pelo consumidor.

Um dos grandes objetivos das ações de GLD é a redução dos picos na curva de demanda de modo que os custos associados à geração, transmissão e distribuição (GTD), necessários para suprir a demanda de energia elétrica no horário do pico, sejam postergados. Para tanto são utilizados métodos que alteram a forma da curva de demanda.

Segundo Chade (2004), os principais métodos de GLD que geralmente são utilizados são: redução da ponta de carga, redução estratégica de carga, preenchimento de vales, crescimento estratégico de carga, deslocamento de carga e flexibilidade da carga. A figura 2.18 ilustra o princípio de ação dos métodos citados na curva de demanda.



**Figura 2.18** Princípio de Ação dos Métodos GLD

Analisando a figura nota-se que de um modo geral os métodos tendem a diminuir a diferença entre picos e vales na curva de demanda. Através desses métodos torna-se possível diminuir o pico de demanda ou distribuí-lo quando necessário. Segundo Salazar (2004), a introdução dos SASAD nos domicílios encaixa-se nos conceitos de corte de ponta, conservação estratégica e deslocamento de carga.

Diversos autores na literatura buscaram associar a utilização de sistemas solares como ação de GLD aos os impactos de economia de energia sob a perspectiva do consumidor e da concessionária. Dentre eles vale citar Oliva & Borgqes (1996), Matajs (1997), Almeida et al.

(2001), Pereira et al. (2003) e Sales (2008). No entanto, apesar das importantes contribuições destes trabalhos para análise do desempenho térmico e viabilidade técnico-econômica dos SASAD, os resultados obtidos são provenientes de análises teóricas ou cálculos simplificados, apresentando assim muitas vezes resultados incompletos.

Buscando resultados mais concisos de estimativa dos impactos da utilização do sistema de aquecimento solar de água, Salazar (2004) e Naspolini et al (2008) quantificaram o potencial de economia de energia e redução no pico de demanda através de dados obtidos em um experimento de escala realizado em Florianópolis em 2003. No entanto, trabalhos como estes requerem um investimento financeiro relativamente alto e muito tempo para ser desenvolvido.

Segundo Oliveira (2007), uma outra maneira adequada de estimar o desempenho anual do sistema seria teoricamente, realizando uma simulação detalhada do sistema, utilizando para isso um software computacional adequado e dados meteorológicos em uma base horária. Ainda de acordo com o autor, essa opção tem se tornado muito popular com o crescente avanço computacional e virtualização da sociedade.

## **2.4 Simulações dos SASAD para Estimativa da Economia de Energia**

Simulações são como “experimentos numéricos”, podendo fornecer praticamente os mesmos tipos de informações a respeito do desempenho térmico do sistema que um experimento real forneceria (Duffie e Beckman, 2003). Trata-se ainda de uma opção relativamente mais rápida e de menor custo, podendo inclusive operar em condições que um experimento real não possibilitaria. No entanto, o processo de simulação deve ser utilizado de maneira adequada, considerando cuidadosamente seus principais aspectos e respeitando suas limitações de aplicações.

Sob a perspectiva de projetos de sistemas de aquecimento solar de água e análise do seu desempenho térmico durante o tempo de operação, a simulação pode ser considerada uma ferramenta poderosa. É possível obter em um curto tempo de processamento informações como a distribuição da temperatura no reservatório, perdas para o ambiente e ganho energético durante um ano de operação (Felipe, 2009).

O princípio básico da simulação consiste em resolver simultaneamente o conjunto de equações algébricas e diferenciais que governam fisicamente todo o sistema. Logo, a habilidade que os modelos

matemáticos têm de representar fisicamente cada componente é um dos fatores determinantes para qualidade dos resultados. Por isso, durante todo período de aplicação das simulações para análise de sistemas solares, buscou-se sempre direcionar um esforço especial no processo de validação experimental dos modelos utilizados (Duffie e Beckman, 2006).

Além de um modelo bem formulado, outro parâmetro que merece destaque a fim de garantir a confiabilidade dos resultados é a qualidade dos dados meteorológicos utilizados na simulação. Os dados meteorológicos devem representar realisticamente o clima e as variações temporais do local onde o sistema solar for instalado. Em vista disto, dados no formato TMY (*Typical Meteorological Year*) têm sido bastante utilizados (Boland e Dik, 2001). Os dados TMY são construídos para corresponder a um ano “típico”, considerando a ocorrência de períodos quentes/frios, ensolarados/nublados e úmido/seco em todos os meses do ano.

Segundo Duffie e Beckman (2006), nas últimas duas décadas centenas de programas para simulação foram desenvolvidos com a finalidade de estudar os processos de conversão de energia térmica, energias renováveis e balanço energético em edificações. Neste contexto, existem diversos programas que podem ser utilizados para simulação de sistemas de aquecimento solar de água. No entanto, de acordo com Felipe (2009), é difícil fazer uma lista completa dos programas existentes, considerando que muitos são desenvolvidos para um fim específico, alguns estão disponíveis apenas para o meio acadêmico que o desenvolveu e outros ainda não estão concluídos.

Entre os programas que podem ser utilizados para simulação de sistemas de aquecimento solar de água atualmente destacam-se o T\*SOL da Valentin Energie Software, Solar Pro 2.0 da Maui Solar Software, GetSolar 8.2, SolTerm 5.0, SISCOS do GreenSolar/PUC-Mg, TRNSYS e F-chart do Solar Energy Laboratory / Universidade de Wisconsin, RETScreen, TermoSim do Laboratório de Energia Solar / UFRGS (Felipe, 2009). No entanto, estes são apenas uma pequena seleção dos inúmeros programas existentes. É importante ressaltar que cada programa possui uma característica particular, de modo que a escolha do programa “ideal” irá depender fortemente dos objetivos específicos que se pretende atingir.

Diante do exposto, Connolly et al. (2010) elaborou uma revisão de diferentes programas de simulação que podem ser utilizados para analisar a integração de sistemas com energias renováveis, para ajudar na seleção do programa adequado para cada finalidade específica. Neste

estudo, inicialmente 68 programas foram considerados e posteriormente 37 foram incluído na análise final, que inclusive contava ainda com a colaboração dos autores dos programas. Entre as conclusões obtidas, estão que o *TRNSYS* é um programa adequado para a simulação do desempenho térmico de sistemas solares de menor porte como os sistemas de aquecimento solar de água doméstico.

O *TRNSYS* tem sido utilizado extensivamente para simular o desempenho de sistemas de aquecimento solar de água doméstico e a sua penetração no setor energético. Dentre os trabalhos que contemplam sua utilização, é importante citar alguns que se encaixam neste contexto.

Cragan et al (1995), analisaram o impacto da utilização de doze diferentes sistemas de aquecimento solar em uma concessionária de energia elétrica no estado de Wisconsin - EUA, considerando dados como custos de geração evitados, economia de energia, redução do pico da curva de demanda e a contribuição para melhora da capacidade de geração da concessionária propiciada pelo uso de sistemas de aquecimento solar. Adotando um procedimento semelhante, (TRZESNIWESKI ET AL, 1996) quantificaram o impacto de 5.000 unidades de um sistema de aquecimento solar também em Wisconsin.

Abreu (2000) investigou o desempenho de três diferentes configurações de sistemas de aquecimento de água solar na cidade de Florianópolis-SC considerando a fração solar como critério de análise. Neste mesmo contexto, Junior (2000) através de simulações anuais dos sistemas de aquecimento solar de água investigou a economia de energia em Porto Alegre utilizando gás como energia auxiliar.

Lima (2003) otimizou o dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água para edificações unifamiliares em São Paulo.

Salazar (2004) validou, em experimento realizado no LABSOLAR/UFSC, o modelo computacional do sistema de aquecimento solar de água compacto, disponível no software *TRNSYS*, com o intuito de viabilizar o uso do software para previsão do impacto de sistemas de aquecimento solar de água em qualquer cidade brasileira.

Arias et al (2007) investigaram a sensibilidade do desempenho anual de um sistema de aquecimento solar doméstico ao nível de estratificação do seu reservatório.

Por fim, Colle et al (2010), sob a perspectiva da fração solar, comparou o desempenho de três configurações do modelo de sistema de aquecimento de água solar do *TRNSYS* com um modelo simplificado desenvolvido no LABSOLAR/UFSC, a fim de que qualificar este modelo simplificado como uma ferramenta de simulação capacitada de realizar outras análises não cabíveis ao *TRNSYS*.

Entre os trabalhos disponíveis na literatura, nota-se que alguns deles foram desenvolvidos em cidades brasileiras. No entanto, a análise predominante sempre restringe-se a uma única cidade.

Embora o modelo computacional do *TRNSYS* referente ao sistema de aquecimento solar de água compacto tenha sido validado e o *SWERA* disponibilize os dados meteorológicos necessários para simulação em 20 cidades brasileiras, até o presente momento não existe nenhum trabalho que extenda a análise do desempenho do sistema para as demais cidades brasileiras, afim de quantificar o verdadeiro impacto da utilização dos sistemas de aquecimento solar de água no Brasil.

### 3 MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ESTIMAR O DESEMPENHO TÉRMICO DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

No capítulo anterior foram descritos os conceitos fundamentais para a compreensão do desenvolvimento deste trabalho. Uma vez que estes conceitos tenham sido compreendidos, neste capítulo seguinte serão apresentados os métodos que serão utilizados para estimar o desempenho térmico anual dos sistemas de aquecimento solar de água, possibilitando então que com seus resultados os impactos do seu uso no setor residencial brasileiro possa ser quantificado.

Para isso, o capítulo se divide em três partes. Na primeira delas o software *TRNSYS* é apresentado, acompanhado dos modelos matemáticos que serão utilizados. Em seguida é descrito o algoritmo com a modelagem física do problema simplificada, desenvolvido no LABSOLAR/UFSC, que será utilizado em uma análise complementar que não pode ser efetuada com o *TRNSYS*. Por fim, é apresentado o método de projeto *f-chart*, o qual será utilizado com o intuito de estender os resultados obtidos para todo território brasileiro afim de se obter um mapeamento dos impactos no país.

#### 3.1 TRNSYS: O PROGRAMA DE SIMULAÇÃO TRANSIENTE

O *TRNSYS*, *Transient System Simulation Program*, é um programa de simulação de sistemas térmicos em regime transiente que está disponível comercialmente desde 1975. Originalmente desenvolvido para sistemas térmicos solares, o programa atualmente pode ser utilizado para simulação de qualquer sistema térmico cujo seu desempenho varie em função do tempo. No momento o *software* é mantido por uma colaboração internacional entre os Estados Unidos (*Thermal Energy System Specialists* e o *Solar Energy Laboratory* da Universidade de Wisconsin), a França (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*) e a Alemanha (*TRANSOLAR Energietechnik*).

A principal característica do *TRNSYS* está na sua estrutura modular. Neste contexto, todos os componentes dos sistemas estão separados individualmente e disponíveis ao usuário de maneira organizada na biblioteca padrão do software. Dessa forma, para realizar a simulação do desempenho do sistema como um todo, os componentes devem ser selecionados da biblioteca e em seguida interligados dentro de uma janela de montagem, de modo que seja garantido um fluxo de

informações entre eles. Cada componente é modelado matematicamente por um sistema de equações e o papel do *TRNSYS* é resolver essas equações simultaneamente para cada intervalo de tempo, assegurando a convergência da solução.

Para a solução do sistema de equações o programa usa um intervalo de tempo que deve ser definido previamente, podendo variar entre 0,01 segundos e 1,0 hora. O *TRNSYS* exige ainda que seja escolhido também o método numérico para solução das equações. Existem três opções disponíveis: o método de Euler modificado, o método de Heun não auto-inicializador e o método de Adams de quarta ordem. Entre estes, o método de Euler modificado é o mais utilizado, sendo adotado pelo software como método padrão.

A técnica de simulação modular, utilizada pelo programa, reduz sensivelmente a complexidade da simulação do sistema uma vez que converte um grande problema em vários problemas menores que podem ser resolvidos mais facilmente. Além disso, a sua modularidade lhe garante ainda uma grande flexibilidade, permitindo que seja montada qualquer configuração desejada do sistema.

### **3.1.1 Montagem do Sistema de Aquecimento Solar de Água para Simulação**

A montagem do sistema físico real no programa é a primeira direção que deve ser tomada para simulação do seu desempenho. Para isto, primeiramente deve-se selecionar os componentes desejados na biblioteca do software. Nesta, uma lista com vários componentes de diversos sistemas está disponível. No sistema computacional, estes componentes são representados por subrotinas escritas em Fortran, com código fonte aberto. Dessa forma torna-se possível ainda que novos componentes sejam modelados e incluídos na biblioteca.

Os componentes utilizados para a simulação do sistema de aquecimento solar de água adotado no presente trabalho estão disponíveis na biblioteca padrão do *TRNSYS* e são apresentados na tabela 3.1. Em seguida é feita uma descrição de cada um deles citando a sua função na simulação e os principais aspectos relacionados a sua composição.

**Tabela 3.1** Componentes Utilizados para simulação do SASAD

<i>Ícone</i>	<i>Subrotina</i>	<i>Componente</i>
	Type 109	Weather data Reading and Processing
	Type 14	Time-dependent forcing function: Water Draw
	Type 11	Tee-piece, Tempering valve
	Type 45	Thermosyphon collector with integral storage
	Type 4	Thermal Storage
	Type 6	Auxiliary Heater
	Type 24	Quantity Integrator
	Type 25	Output Printer

O Type 109, Weather data Reading and Processing, é a subrotina utilizada para cumprir dois papéis primordiais na simulação. Primeiro, a leitura dos dados meteorológicos. Esta é realizada a partir de um arquivo externo de entrada com dados meteorológicos organizados em um intervalo de tempo regular. Em seguida, é feito o processamento dos dados lidos de modo a fornecer a quantidade de radiação solar incidente no plano inclinado e o ângulo de incidência para um número arbitrário de superfícies. Para isso a subrotina oferece quatro opções de modelos consolidados para efetuar este cálculo, que são: Céu Isotrópico, HDKR, Perez e Reindl.

O Type 14, Time-dependent forcing function: Water Draw, é utilizado na simulação com o intuito de representar a taxa de água quente consumida nas residências. Em uma simulação transiente é conveniente que este consumo seja representado por uma função de carga dependente do tempo que apresente um padrão de comportamento cíclico. Neste contexto, esta subrotina contém uma função de carga que consiste de um conjunto de pontos discretos, indicando o valor da função em vários períodos de tempo durante um ciclo. Quando há necessidade de gerar um conjunto de pontos contínuos esta subrotina usa uma interpolação linear a partir dos dados discretos. A repetição do ciclo da função vai ocorrer a cada N horas, onde N é o último valor de tempo especificado. A unidade utilizada pela função de carga é quilograma por hora.

O Type 11, Tee-piece / Tempering valve, é uma subrotina que possui dez modos de operação, podendo ser utilizada para variadas funções. Para o sistema de aquecimento solar adotado no presente trabalho, serão utilizados apenas os modos 01 e 04. Quando pré-determinada a operar no modo 01, esta subrotina representa um misturador (peça em T), misturando completamente duas entradas de um mesmo fluido a diferentes temperaturas. Por outro lado, quando no modo 04, representa uma válvula termostática.

O Type 45, Thermosyphon Collector with Integral Storage, representa um coletor solar com reservatório térmico acoplado operando como sistema passivo (termosifão). O componente consiste de um coletor solar plano, um reservatório térmico estratificado posicionado acima da placa coletora, uma válvula de verificação para evitar fluxo reverso e água como fluido de trabalho. Para análise, a subrotina assume um regime permanente para o fluxo de circulação natural entre o tanque e o coletor, e em seguida divide o “loop” de circulação em um número de segmentos normal a direção do fluxo para então é aplicar a equação de Bernoulli para escoamentos incompressíveis em cada segmento do “loop”. Desta forma o valor do fluxo pode ser obtido através da solução numérica do sistema de equações resultante. A estratificação no reservatório térmico é modelada usando o modelo plug flow.

O Type 4, Thermal Storage, representa um reservatório térmico com resistência interna em seu interior, posições de entrada e saída de água fixas, e ainda sob efeito ou não da estratificação. Para isso, esta subrotina assume que o reservatório térmico é composto por N segmentos com temperatura uniforme e de mesmo volume. Em seguida, o nível de estratificação é determinado pelo valor de N assumido. Portanto, para representar um reservatório sem estratificação basta

assumir  $N = 1$ . A subrotina permite ainda que seja pré-definida uma temperatura de “deadband” para melhorar o controle do termostato sob o acionamento do aquecedor auxiliar interno. É assumido ainda que as perdas térmicas no reservatório são uniforme.

O Type 6, Auxiliary Heater, representa um chuveiro elétrico com potência variável e um controle interno de temperatura. Esta subrotina é modelada para adicionar calor a corrente de fluido em uma taxa pré-determinada ( $Q_{max}$ ) sempre que o sinal do controlador for igual a um e a temperatura de saída for menor do que uma temperatura pré-determinada ( $T_{set}$ ).

O Type 24, Quantity Integrator, é uma subrotina adicionada a simulação para facilitar o pós-processamento dos resultados. Seu papel é integrar, sobre um determinado período de tempo, uma série de variáveis geradas durante toda a simulação. A integração é programada para reiniciar periodicamente, seja depois de um número específico de horas ou a cada mês do ano. Cada subrotina desta que seja adicionada a simulação pode integrar até 500 variáveis diferentes.

Por fim, o Type 25, Output Printer, é a subrotina utilizada apenas para imprimir as variáveis de interesse, nos intervalos de tempo desejados, no decorrer da simulação.

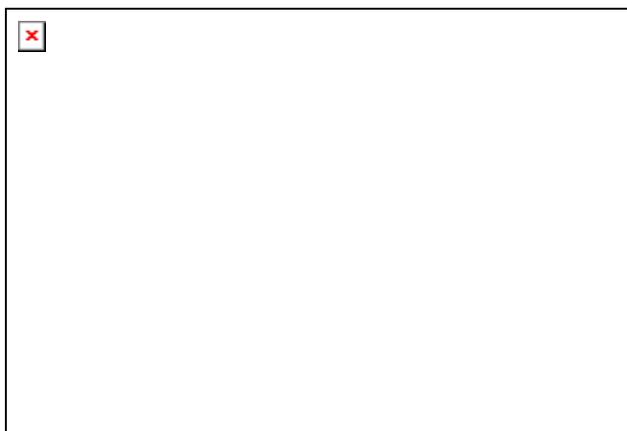
Uma vez que tenham sido selecionadas as subrotinas computacionais que irão representar os componentes do sistema físico real, finalmente é feita a montagem para realizar a simulação.

A montagem pode ser efetuada realizando um procedimento simples, no qual os ícones das subrotinas escolhidas são levados até a janela de montagem e por conseguinte “conectados” através da utilização de linhas de conexão disponíveis no software, as quais irão representar o fluxo de informações entre eles. A figura 3.1 ilustra o sistema montado.



**Figura 3.1** Interface de montagem do *TRNSYS*

Por fim, antes de executar a simulação, é necessário ainda fornecer valores para os parâmetros operacionais de entrada de todas as subrotinas utilizadas na janela de montagem. Para isso, basta clicar no ícone desejado e informar os valores manualmente no formulário que irá aparecer, conforme mostra figura 3.2.



**Figura 3.2** Janela de entrada dos parâmetros das subrotinas

Após as considerações expostas, a simulação é iniciada e o programa faz as interações necessárias para resolver simultaneamente as equações que modelam matematicamente o comportamento dos componentes do sistema.

### 3.1.2 Modelos Matemáticos

Diante do exposto, torna-se importante conhecer detalhadamente os modelos matemáticos que compõem as subrotinas e governam fisicamente os componentes do sistema adotado no presente trabalho. Portanto, a seguir, são apresentados os sistemas de equações que representam fisicamente a radiação solar incidente, o coletor solar com reservatório térmico acoplado, o misturador, o tanque de armazenamento e o chuveiro elétrico para aquecimento auxiliar.

#### 3.1.2.1 Radiação Solar Incidente no Plano Inclinado

De acordo com as recomendações de Reindl et al. (1990), que comparou cinco diferentes modelos para estimativa da radiação solar total incidente na superfície do coletor, é adotado no presente trabalho o modelo de Perez et al. (1988) visto que este apresentou melhor desempenho que os demais.

O modelo de Perez baseia-se em um tratamento detalhado dos componentes da radiação difusa, levando em consideração a radiação difusa circumsolar, o brilho do horizonte e a radiação difusa isotrópica. Para tanto, foram derivados coeficientes empíricos que descrevem as condições do céu,  $F_1$  e  $F_2$ , e também os termos  $a$  e  $b$ , que computam os ângulos de incidência da radiação circumsolar na superfície inclinada. Sendo assim, o total de radiação solar incidente na superfície inclinada do coletor é então estimado através da equação 3-1.

$$I_T = I_b R_b + I_d (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_d F_1 \frac{a}{b} + I_d F_2 \sin \beta + I \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3-1)$$

Os termos  $a$  e  $b$ , são obtidos através da equação 3-1 e 3-2, respectivamente.

$$a = \max(0, \cos\theta) \quad (3-1)$$

$$b = \max(\cos 85, \cos\theta_z) \quad (3-2)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de incidência na superfície e  $\theta_z$  o ângulo de zênite.

Já os coeficientes  $F_1$  e  $F_2$ , são funções de um parâmetro de claridade,  $\varepsilon$ , e de um parâmetro de brilho,  $\Delta$ , os quais devem se calculados previamente através das equações 3-3 e 3-4, respectivamente.

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

$$\Delta = \frac{I_d}{I_o} \quad (3-4)$$

Uma vez obtidos os parâmetros  $\varepsilon$  e  $\Delta$ , os coeficientes  $F_1$  e  $F_2$  podem então ser calculados através das equações 3-5 e 3-6.

$$F_1 = \max\left[0, \left(f_{11} + f_{12}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{13}\right)\right] \quad (3-5)$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22}\Delta + \frac{\pi\theta_z}{180} f_{23} \quad (3-6)$$

Para obter os coeficientes de Perez,  $f_{xy}$ , presentes nas equações 3-5 e 3-6, basta utilizar a tabela 3.1 e determinar o valor de cada coeficiente em função do valor de  $\varepsilon$  calculado na equação 3-3.

**Tabela 3.1** Coeficientes de Perez

$\varepsilon$	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
1,000 - 1,065	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
1,065 - 1,230	0,130	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
1,230 - 1,500	0,330	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
1,500 - 1,950	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	0,014
1,950 - 2,800	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	0,001
2,800 - 4,500	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
4,500 - 6,200	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
> 6,200	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

O conjunto de equações apresentado junto a tabela 3.1 constituem a versão do modelo de Perez disponível na subrotina type 109 do software *TRNSYS*, a qual é utilizada na simulação do presente trabalho para geração dos dados horários de radiação solar total incidente no plano inclinado. A seguir, são apresentados os modelos referentes aos demais componentes do sistema.

### 3.1.2.2 Coletor Solar com Reservatório Térmico Acoplado

Para representar matematicamente o coletor solar com reservatório térmico acoplado, operando em modo termosifão, é utilizado no presente trabalho o modelo de Morrison e Braun (1985). Segundo Lima (2003), o modelo adotado é apropriado para sistemas passivos porque considera-se que não há mistura entre o fluxo de chegada e o fluxo no interior do tanque.

Neste modelo, primeiramente é assumida a hipótese de regime permanente para o escoamento. Em seguida, o ciclo do movimento é dividido em um número  $N$  de segmentos normais a direção do fluxo e a equação de Bernoulli é aplicada em cada segmento destes. Desta forma, a variação de pressão em qualquer segmento,  $i$ , pode ser determinada através da equação 3-7,

$$\Delta P_i = \rho_i g \Delta h_i + \rho_i g h_{L_i} \quad (3-7)$$

onde  $\rho_i$  é a massa específica da água,  $g$  a aceleração da gravidade,  $\Delta h_i$  a altura vertical do segmento e  $h_{L_i}$  é as perdas por atrito na tubulação.

Neste contexto, o modelo assume ainda que em cada instante de tempo a soma das variações de pressão durante todo o ciclo do movimento é nula, conforme equação 3-8.

$$\sum_{i=1}^N \rho_i \Delta h_i = \sum_{i=1}^N \rho_i h_{Li} \quad (3-8)$$

Portanto, sob as condições impostas, o fluxo do escoamento no sistema termosifão pode então ser determinado. Por conseguinte, é apresentado como o modelo adotado trata os segmentos do ciclo referentes ao coletor, reservatório e a tubulação que faz a conexão entre estes.

No coletor solar, o desempenho térmico é estimado de acordo com a equação de Hottel-Whillier. Desta forma, a temperatura no ponto central de qualquer segmento  $k$  do coletor, pode ser determinada através da equação 3-9.

$$T_{ck} = T_a + \left( T_{ci} - T_a - \frac{I_T F_R (\tau\alpha)}{F_R U_L} \right) \exp \left[ - \frac{F' U_L A_c (k - 0,5)}{m c_p N_c} \right] + \frac{I_T F_R (\tau\alpha)}{F_R U_L} \quad (3-9)$$

Onde  $T_{ci}$  é a temperatura do fluido na entrada do coletor,  $T_a$  a temperatura ambiente,  $N_c$  o número fixo de segmentos no coletor,  $A_c$  a área do coletor,  $I_T$  a radiação total incidente na superfície coletora. O  $F_R U_L$ ,  $F_R (\tau\alpha)$  e  $F' U_L$  são parâmetros de eficiência do coletor obtidos a partir do seu teste experimental de caracterização.

No teste de caracterização do coletor, a curva de eficiência fornece os valores de  $F_R U_L$  e o  $F_R (\tau\alpha)_n$ , os quais são dados de entrada para o modelo. Por sua vez, multiplicando o  $F_R (\tau\alpha)_n$  por um fator modificador do ângulo de incidência,  $K_{\tau\alpha}$ , o parâmetro  $F_R (\tau\alpha)$  é então determinado. A função do  $K_{\tau\alpha}$  é computar uma dependência da propriedade ótica de transmitância-absortância da superfície coletora,  $(\tau\alpha)$ , em relação ao ângulo de incidência da

radiação solar,  $\theta$ . Para isso, é adotado neste modelo a equação 3-10, sugerida por Souka e Safwat (1966) para representar o  $K_{\tau\alpha}$  em coletores solares com superfície plana,

$$K_{\tau\alpha} = 1 - b_o \left( \frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (3-10)$$

Onde  $b_o$  é o coeficiente do modificador do ângulo de incidência.

Já o parâmetro  $F'U_L$ , este deve ser calculado em função do  $F_R U_L$  e do fluxo mássico nas condições do teste do coletor, conforme equação 3-11.

$$F'U_L = -\frac{\dot{m}_{teste} c_p}{A_c} \ln \left( 1 - \frac{A_c F_R U_L}{\dot{m}_{teste} c_p} \right) \quad (3-11)$$

Como os parâmetros obtidos nas condições de teste de caracterização dos coletores solares muitas vezes são medidos em fluxos diferentes daqueles impostos nas condições reais de operação do equipamento, é definido adicionalmente um fator de correção do fluxo, conforme equação 3-12.

$$r = \frac{F_{R,uso}}{F_{R,teste}} = \frac{\dot{m} \left( 1 - \exp \left( -\frac{F'U_L}{\dot{m} c_p} \right) \right)}{\dot{m}_{teste} \left( 1 - \exp \left( -\frac{F'U_L}{\dot{m}_{teste} c_p} \right) \right)} \quad (3-12)$$

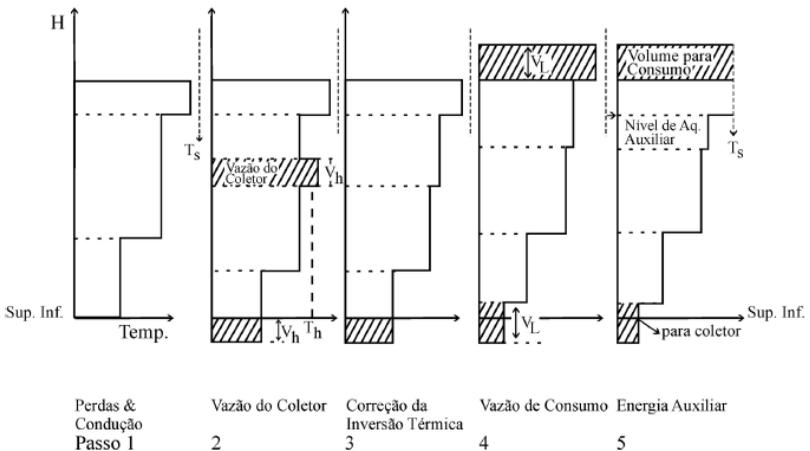
Uma vez determinado os parâmetros de eficiência e as correções necessárias, a taxa do ganho energético útil no coletor solar pode ser calculada através da equação 3-13.

$$\dot{Q}_u = r A_c \left[ F_R \left( \alpha \tau_g - F_R U_L \right) (C_{ci} - T_a) \right] \quad (3-13)$$

Por fim, aplicando-se um simples balanço de energia no coletor obtêm-se a temperatura de saída do fluido, conforme equação 3-14.

$$T_{co} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{m}c_p} + T_{ci} \quad (3-14)$$

Para o comportamento físico do reservatório térmico, é adotado o modelo de estratificação *plug flow*, o qual baseia-se na hipótese de que os segmentos de fluido no interior do tanque possuem tamanhos variáveis. Neste contexto, o tamanho dos segmentos irá depender do intervalo de tempo utilizado na simulação, magnitude do coletor, perfil de consumo de água quente, perdas térmicas e consumo de energia auxiliar. A figura 3.3 ilustra o conceito deste modelo para um melhor entendimento.



**Figura 3.3** Exemplo ilustrativo do modelo de estratificação *plug flow*

De acordo com a figura acima, considera-se que o reservatório está inicialmente dividido em três segmentos de fluido. Sendo assim, o primeiro procedimento adotado pelo modelo é calcular a distribuição de temperatura nos segmentos em decorrência das perdas térmicas para ambiente e condução entre eles. Para isto, um balanço de energia deve ser aplicado em cada segmento, conforme equação 3-15,

$$\rho c_p V_i \frac{dT_i}{dt} = -(UA)_i (T_i - T_a) + (kA)_{i-1} \frac{(T_{i-1} - T_i)}{\Delta h_{i-1}} - (kA)_i \frac{(T_i - T_{i+1})}{\Delta h_{i+1}} \quad (3-15)$$

onde  $\Delta h_{i-1}$  é a separação entre o centro dos segmentos  $i-1$  e  $i$ , e  $\Delta h_{i+1}$  a separação entre o centro dos segmentos  $i+1$  e  $i$ .

O segundo passo, é computar o ganho energético no reservatório proveniente do coletor solar. Nesta etapa, durante o intervalo de tempo  $t_1$ , chega ao reservatório térmico uma porção de fluido de volume  $V_h$  e temperatura  $T_h$ . Esta porção de fluido que chega se instala na parte superior do tanque. Com isso, os segmentos que se encontram abaixo dessa nova porção fluido movem-se no sentido do fundo do tanque em uma quantidade equivalente àquela circulando no coletor.

Em seguida, no terceiro passo é avaliado se o procedimento anterior produziu alguma inversão térmica. Caso tenha ocorrido, a porção de fluido é realocada de modo que a inversão térmica seja eliminada. Caso contrário, é dada continuidade ao processo e segue para o próximo passo.

Por conseguinte, no quarto passo é avaliado a demanda energética retirada do tanque para consumo. A medida que uma porção de fluido está sendo retirado para consumo, neste mesmo instante de tempo  $t_1$  uma nova porção de fluido é simultâneamente adicionada ao reservatório, proveniente da rede de abastecimento. Logo, esta porção que chega com um volume  $V_L$  e temperatura  $T_L$  se instala no fundo do tanque. Com isso, os segmentos que se encontram acima dessa nova porção de fluido movem-se no sentido do topo, em uma quantidade equivalente àquela que foi consumida. Portanto, o deslocamento total de líquido no reservatório será  $V_L$  na parte superior e  $(V_h - V_L)$  na parte inferior.

Por fim, o aquecimento auxiliar no interior do reservatório é considerado. Nesta última etapa, caso o aquecimento auxiliar precise ser acionado, avalia-se a potência energética do dispositivo e então, havendo energia suficiente para atender a demanda, o aquecimento auxiliar é acionado aquecendo os segmentos acima do nível em que se encontra o equipamento até uma temperatura desejada.

Após todos os procedimentos serem realizados, finalmente um novo perfil de temperatura e volume é estabelecido no reservatório e todo o processo é repetido no intervalo de tempo seguinte,  $t_1 + \Delta t$ .

Durante o procedimento, segmentos e frações de segmentos que se encontram fora dos limites do reservatório são enviados para demanda e para placa coletora. Para determinar a temperatura média do fluido enviado a demanda, a equação 3-16 pode ser utilizada.

$$T_D = \frac{1}{V_L} \left[ aT_j V_j + \sum_{i=1}^{j-1} T_i V_i \right] \quad (3-16)$$

Satisfazendo as condições das equações 3-17 e 3-18.

$$0 \leq a < 1 \quad (3-17)$$

$$V_L = aV_j + \sum_{i=1}^{j-1} V_i \quad (3-18)$$

Por outro lado, para determinar a temperatura média do fluido que chega ao reservatório, a equação 3-19 pode ser utilizada,

$$T_R = \frac{1}{V_h} \left[ bT_k V_k + \sum_{i=k+1}^N T_i V_i \right] \quad (3-19)$$

Satisfazendo as condições das equações 3-20 e 3-21.

$$0 \leq b < 1 \quad (3-20)$$

$$V_h = bV_k + \sum_{i=k+1}^N V_i \quad (3-21)$$

Por fim, uma vez determinado o perfil de estratificação no tanque, o ganho de energia no reservatório pode ser estimado através da equação 3-22 e a energia retirada para o consumo, assim como a energia perdida para o ambiente, podem ser estimados através das equações 3-23 e 2-24 respectivamente.

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_h c_p (T_h - T_R) \quad (3-22)$$

$$\dot{Q}_{out,uso} = \dot{m}_L c_p (T_D - T_L) \quad (3-23)$$

$$\dot{Q}_{out,amb} = \sum_{i=1}^N (UA)_i (T_i - T_a) \quad (3-24)$$

Na análise da tubulação que faz a conexão entre o coletor e o reservatório térmico, é assumida a hipótese de que esta pode ser considerada um único segmento com capacitância térmica desprezível. Logo, aplicando um balanço de energia neste segmento, obtém-se a equação 3-25 para temperatura média do fluido no interior da tubulação e a equação 3-25 para temperatura do fluido na saída desta,

$$\bar{T}_p = T_a + (T_{pi} - T_a) \left[ \frac{\dot{m}c_p}{(UA)_p} \right] \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{-(UA)_p}{\dot{m}c_p} \right] \right\} \quad (3-25)$$

$$T_{po} = T_a + (T_{pi} - T_a) \cdot \exp \left[ \frac{-(UA)_p}{\dot{m}c_p} \right] \quad (3-26)$$

onde  $T_a$  é a temperatura ambiente,  $T_{pi}$  a temperatura de entrada do fluido na tubulação e  $(UA)_p$  é o coeficiente global de transferência de calor da tubulação para o ambiente.

Por sua vez, as perdas de carga na tubulação podem ser estimadas através da equação 3-27,

$$H_p = \frac{fLV^2}{2D} + \frac{kV^2}{2} \quad (3-27)$$

onde  $L$  é o comprimento dos tubos,  $V$  a velocidade do fluido em seu interior,  $D$  o diâmetro da tubulação,  $k$  o comprimento equivalente e  $f$  o fator de atrito no tubo, o qual é definido conforme as equações 3-28 e 3-29.

$$f = \frac{64}{R_e} \text{ para } R_e \leq 2000 \quad (3-28)$$

$$f = 0,032 \text{ para } R_e > 2000 \quad (3-29)$$

Adicionalmente, a perda de carga em cada segmento do ciclo termosifão pode ser estimada. Para isto, é utilizada as relações apresentadas no quadro 3.1, onde  $D_1$  é do diâmetro de entrada,  $D_2$  o diâmetro de saída,  $N_R$  o número de ascensores paralelos,  $L_h$  o comprimento dos cabeçotes,  $V_h$  a velocidade no fluido que entra no cabeçote e  $P_h$  a perda de carga total nos cabeçotes do coletor.

Por fim, o conjunto de equações apresentado constituem o modelo de coletor solar com reservatório térmico acoplado, operando em modo termosifão, disponível na subrotina type 45 do software TRNSYS, a qual é utilizada na simulação do presente trabalho.

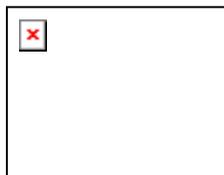
### 3.1.2.3 Misturador e Válvula Termostática

O misturador do sistema de aquecimento solar de água é modelado aplicando um simples balanço de energia no componente, obtendo assim as equações 3-30 e 3-31,

$$T_o = \frac{\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2}{\dot{m}_o} \quad (3-30)$$

$$\dot{m}_o = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (3-31)$$

onde o subíndice  $o$  representa a saída do componente e os subíndices 1 e 2 as duas entradas, conforme é ilustrado na figura 3.4.



**Figura 3.4** Conceito do Misturador

Segmento	Relação Adotada
Passagens do tanque para a tubulação e da tubulação para o coletor	$k = 0,5$
Tubos de conexão e ascensores	$f = f[1 + 0,038/(L/R_e/D)^{0,964}]$
Curvas na tubulação	
Curva de 90°	$k = k + 30D, R_e \leq 2000$ $k = 1, R_e > 2000$
Curva de 45°	$k = k + 20D, R_e \leq 2000$ $k = 0,6, R_e > 2000$
Junção da tubulação, cabeçotes e ascensores	
Expansão súbita	$k = 0,667(D_1/D_2)^4 - 2,667(D_1/D_2)^2 + 2$
Redução súbita	$k = -0,3259(D_2/D_1)^4 - 0,1784(D_2/D_1)^2 + 0,5$
Coletor	$S_1 = \sum_{i=1}^{N_R} \left[ (N_R - i + 1) / N_R \right]^2$ $S_2 = \sum_{i=1}^{N_R} \left[ (N_R - i + 1)^2 / N_R \right]^2$ $A_{11} = A_{12} = [fL_h(V_h)^2] / (2D_h)$ $A_2 = \rho V_h^2 / 2$ $P_h = (-S_1 A_{11} + 2S_2 A_2 + S_1 A_{12}) / 2$
Entrada do Reservatório	$k = 1$
Interior do Reservatório	desprezada

**Quadro 3.1** Ajustes para calcular perda de carga nos segmentos

Para modelar a válvula termostática, o mesmo sistema de equações é utilizado, no entanto, o que irá diferenciá-la do misturador é a introdução de um controle interno de temperatura quando a subrotina estiver operando neste modo.

### 3.1.2.4 Reservatório Térmico

Diferentemente do reservatório térmico acoplado ao coletor solar que, como já visto, utiliza o modelo de estratificação *plug flow*, para modelar um segundo reservatório térmico disposto individualmente, é assumida a hipótese de *fully-mixed*, ou seja, sem estratificação em seu interior.

Desta forma, apenas um balanço de energia no componente é suficiente para derivar a sua equação governante 3-32,

$$mc_p \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_u + \dot{P}_{aux} - \dot{L}_s - (UA)_s (T_s - T_a) \quad (3-32)$$

onde  $T_s$  é a temperatura no reservatório,  $\dot{Q}_u$  a taxa em que é adicionada energia ao reservatório provinda do coletor,  $\dot{P}_{aux}$  a taxa em que é adicionado energia ao reservatório provinda da resistência elétrica instalada em seu interior,  $\dot{L}_s$  a taxa em que a energia é removida do reservatório para consumo.

A taxa de consumo pode ser determinada através da equação 3-33,

$$\dot{L}_s = \dot{m}_c c_p (T_s - T_{rd}) \quad (3-33)$$

onde  $\dot{m}_c$  é a vazão de água retirada do reservatório e  $T_{rd}$  a temperatura da água fornecida pela rede de abastecimento.

### 3.1.2.5 Chuveiro Elétrico

O chuveiro elétrico é modelado com o único intuito de, quando necessário, adicionar calor a linha de passagem da água, em uma taxa menor ou igual a potência máxima pré-definida para o dispositivo, de modo a atingir uma temperatura desejada para o uso,  $T_{set}$ . Portanto, aplicando simples um balanço de energia no componente, obtem-se a equação 3-34,

$$\dot{Q}_{aux} = \frac{\dot{m}c_p (T_{set} - T_{in})}{\eta_{aux}} \quad (3-34)$$

Onde  $\eta_{aux}$  é a sua eficiência e  $T_{in}$  a temperatura de entrada da água no equipamento.

## 3.2 O ALGORITMO DE SIMULAÇÃO SIMPLIFICADO

Todas as configurações do sistema de aquecimento solar de água adotadas no presente trabalho são essencialmente simuladas no software *TRNSYS*. Entretanto, com a finalidade de analisar o caso particular de acionamento da energia auxiliar apenas no horário da madrugada, um algoritmo de simulação simplificado é aqui apresentado, uma vez que esta análise não seria viável no *TRNSYS*. Tal algoritmo, implementado em Fortran, foi desenvolvido no LEPTEN/LABSOLAR da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC e baseia-se fundamentalmente nos princípios iterativos de previsão-correção para que este seja capaz de estimar a quantidade de energia auxiliar que deve ser utilizada na madrugada, a fim de suprir toda demanda diária.

Para a modelagem matemática dos componentes físicos, assume-se como hipótese que a temperatura do fluido nos reservatórios térmicos não é estratificada (*full-mixed*) de modo que o processo termodinâmico possa ser admitido como quase-estático. A capacitância térmica do coletor e as perdas térmicas nas tubulações de conexão dos componentes também são desprezadas. Por fim, admite-se que a energia térmica do coletor é transportada para o reservatório sempre que o saldo entre o ganho decorrente da radiação e a perda térmica do coletor seja positivo.

Com base nas hipóteses consideradas, é aplicado o balanço de energia no sistema constituído de um coletor solar e dois reservatórios térmicos, para derivar assim as equações diferenciais governantes do modelo simplificado. Como resultado, para o misturador e para o reservatório térmico conjugado ao coletor, obtém-se respectivamente as equações 3-30 e 3-32, que são exatamente as equações obtidas no item anterior para o misturador e reservatório *full-mixed* do *TRNSYS*. Por sua vez, para o segundo reservatório de backup, obtém-se a equação 3-35,

$$(mc_p)_b \frac{dT_b}{dt} = \dot{P}_{aux} - \dot{m}_c c_p (T_b - T_s) - (UA)_b (T_b - T_a) \quad (3-35)$$

onde  $T_b$  é a temperatura no reservatório de backup,  $T_s$  a temperatura do reservatório conjugado ao coletor e  $\dot{m}_c$  a vazão de consumo dos reservatórios.

Portanto, as equações 3-30, 3-32 e 3-35 formam um sistema de equações, onde  $T_b$ ,  $T_s$  e  $\dot{m}_c$  são as incógnitas a determinar. O sistema poderia ser resolvido explicitamente através do método de Euler e suas variantes, como adotado no software *TRNSYS*. No entanto, no presente algoritmo é adotado um método de solução implícito, baseado na integração de Crank-Nicholson (Carnahan et al, 1969).

No procedimento numérico deste método, primeiramente as equações 3-30, 3-32 e 3-35 são integradas no intervalo de tempo  $\Delta t$ , durante o qual considera-se que a temperatura  $T_s$  varia de  $T_s^- = T_s(t)$  a  $T_s^+ = T_s(t + \Delta t)$ , enquanto que a temperatura  $T_b$  varia de  $T_b^- = T_b(t)$  a  $T_b^+ = T_b(t + \Delta t)$ . As integrais das taxas mássicas resultam em  $\Delta m_c$ ,  $\Delta m_b$  e  $\Delta m_s$ , e a integral referente a potência de energia auxiliar em  $\Delta L$ . A integral referente ao termo de capacitância dos reservatórios é substituída por expressões lineares do tipo  $(mc)(T^+ - T^-)$ , enquanto que as integrais de expressões contendo a temperatura são substituídas pelo valor médio expresso pelo produto  $T_m \Delta t$ , onde  $T_m$  é a média ponderada entre  $T^+$  e  $T^-$ , definida conforme equação 3-36.

$$T_m = \alpha T^+ + (1 - \alpha) T^- \quad (3-36)$$

onde  $\alpha$  representa o nível de implicitidade do método, obedecendo o intervalo de  $0 < \alpha < 1$ .

Uma vez efetuadas a integrações, conforme foi descrito, um novo sistema com as equações 3-37, 3-38 e 3-39 é definido.

$$\Delta m_c c_p (T_c - T_o) = \Delta m_s c_p [\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - T_o] \quad (3-37)$$

$$\begin{aligned} (mc)_s (T_s^+ - T_s^-) = & \Delta L_s + A_c [F_R (\tau\alpha)_n K_{\tau\alpha} I_T - F_R U_L \Delta t [\alpha T_s^+ \\ & + (1 - \alpha) T_s^- - T_a]] - (UA)_s \Delta t [(\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- - T_a)] - \Delta m_s \\ & c_p [\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- - T_o] \end{aligned} \quad (3-38)$$

$$\begin{aligned} (mc)_b (T_b^+ - T_b^-) = & \Delta L_b - (UA)_b \Delta t [(\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - T_a)] \\ & - \Delta m_s c_p [\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - \alpha T_s^+ - (1 - \alpha) T_s^-] \end{aligned} \quad (3-39)$$

Os último termos do lado direito das equações 3-37, 3-38 e 3-39, os quais contêm a incógnita  $\Delta m_s$ , são os termos que introduzem a não-linearidade do sistema. Com o intuito de eliminar esta incógnita, as equações 3-38 e 3-39 são multiplicadas membro a membro pelo fator  $[\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - T_o]$ , de modo que o produto da incógnita pelo fator, satisfaça a equação 3-37, e este seja eliminado em favor do produto  $\Delta m_c c_p (T_c - T_o)$ , o qual é conhecido. Como resultado, obtem-se o sistema de equações final, definido pelas equações 3-40 e 3-41.

$$\begin{aligned} \{ (mc_p)_s (T_s^+ - T_s^-) - \Delta L_s - A_c [F_R (\tau\alpha)_n K_{\tau\alpha} I_T - F_R U_L \Delta t \\ (\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- - T_a)] + (UA)_s \Delta t [(\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- - T_a)] \} \\ [\alpha T_b^+ + (1 - \alpha) T_b^- - T_o] - \Delta m_c c_p (T_c - T_o) [\alpha T_s^+ + (1 - \alpha) T_s^- \\ - T_o] = 0 \end{aligned} \quad (3-40)$$

$$\begin{aligned} & \{(mc_p)_b(T_b^+ - T_b^-) - \Delta L_b + (UA)_b \Delta t[(\alpha T_b^+ + (1 - \alpha)T_b^- \\ & - T_a)]\}[\alpha T_b^+ + (1 - \alpha)T_b^- - T_o] - \Delta m_c c_p (T_c - T_o)[\alpha T_b^+ + \\ & (1 - \alpha)T_b^- - \alpha T_s^+ - (1 - \alpha)T_s^-] = 0 \end{aligned} \quad (3-41)$$

Uma vez especificadas as condições iniciais  $T_s^-$  e  $T_b^-$ , as equações 3-40 e 3-41 podem ser resolvidas em termos de  $T_s^+$  e  $T_b^+$ , utilizando-se o método de Newton-Raphson. Desta forma, o procedimento de cálculo sequencial pode ser continuado durante o intervalo de tempo  $\Delta t$  desejado, considerando-se como estado inicial o estado final correspondente ao passo anterior.

No que se refere a precisão do método, estudos preliminares constataram que este modelo adotado subestima a fração solar (COLLE et al., 2010). No entanto, a discrepância nos resultados não seria fator determinante, uma vez que a intenção seja considerá-los como referência para o projeto de sistemas de aquecimento solar, visando reduzir totalmente a demanda de energia de chuveiros elétricos no horário de ponta.

### 3.3 O MÉTODO DE PROJETOS *f*-CHART

A estimativa do desempenho anual de sistemas de aquecimento solar de água através de métodos de simulação detalhados, como é o caso do software *TRNSYS*, requerem dados meteorológicos horários como parâmetro de entrada. Na carência desses dados, a alternativa para efetuar esta estimativa seria através da utilização de métodos de cálculo simplificados. Nesta circunstância, Beckman et al.(1977) desenvolveram uma metodologia simples, conhecida como *f-chart*, capaz de calcular a fração solar do sistema através de dados meteorológicos mensais. Logo, no presente trabalho, utiliza-se o método *f-chart* acoplado a base de dados mensais SWERA, com o propósito de estender para todo território brasileiro as estimativas de economia de energia decorrente da utilização de sistemas de aquecimento solar de água.

O *f-chart* é um método desenvolvido para projetos de sistemas térmicos solares. Embora não forneça informações detalhadas sobre a dinâmica do sistema, o método é capaz de estimar de modo satisfatório o seu ganho energético anual através do cálculo da fração solar. Tal

cálculo é feito a partir de uma correlação com parâmetros do sistema. Esta correlação pôde ser obtida utilizando resultados de centenas de simulações de desempenho térmico, realizadas com a utilização do programa de simulação detalhada, *TRNSYS*, em um computador do tipo *mainframe*.

Apesar de se tratar de um método de cálculo simplificado, o *f-chart* é uma ferramenta extramente útil para o projeto de sistemas térmicos solares ativos e passivos, possibilitando avaliar o tamanho e os parâmetros de eficiência do sistema, adequados para uma determinada condição de demanda. O sub-item seguinte apresenta a origem do método e sua abrangência de aplicação.

### 3.3.1 Origem e Aplicações

Historicamente, o *f-chart* é o primeiro método de cálculo simplificado capaz de quantificar o desempenho energético anual dos sistemas de aquecimento solar. O método foi originalmente desenvolvido como parte da tese de doutorado de Klein (1976), onde foi adotado como uma metodologia para projetos de sistemas de aquecimento solar. Em seguida, um ano após o seu desenvolvimento, o método foi publicado pela primeira vez na comunidade científica no livro intitulado como “Projeto de Sistemas de Aquecimento Solar Através do Método *f-chart*”, com autoria de Beckman, Klein e Duffie (1977).

A partir de então, sob os cuidados do Laboratório de Energia Solar da Universidade de Wisconsin – EUA, o método foi evoluindo e passou a ser programado. As primeiras versões foram implementadas em Fortran, rodando apenas em computadores *mainframe*. Contudo, a partir da versão 5, o programa passou a ser implementado em Basic e estar disponível para microcomputadores, sendo rodado no modo DOS. Atualmente o programa se encontra em sua versão 6.17W e está disponível comercialmente para Windows e MAC. Para a análise proposta no presente trabalho, as equações básicas do método são programadas em Excel pelo próprio autor, uma vez que os resultados obtidos são idênticos àqueles apresentados pelas versões comerciais.

No que se refere a sua abrangência de aplicação, o método foi desenvolvido essencialmente para sistemas de aquecimento solar de água e ambiente, simultaneamente, onde o fluido de trabalho no coletor pode ser líquido ou ar; e também para sistemas de aquecimento solar de água unicamente. Neste contexto, o método atende a uma boa variedade de coletores e composição de sistemas. Todavia, para presente trabalho,

serão consideradas apenas as equações relacionadas ao sistema de aquecimento de solar de água.

### 3.3.2 Equações Básicas

A fração solar mensal,  $f$ , utilizada para estimar o desempenho térmico do sistema de aquecimento solar, é definida no presente método conforme a equação 3-42,

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (3-42)$$

onde o parâmetro  $X$  representa a proporção de perdas térmicas do coletor em relação a demanda energética requerida, e o outro a proporção de radiação solar absorvida em relação a demanda energética requerida,  $Y$ .

Por sua vez, os parâmetros  $X$  e  $Y$  podem ser calculados através das equações 3-43 e 3-44, respectivamente.

$$X = F_R U_L \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot (T_{ref} - \bar{T}_a) \cdot \Delta t \cdot \frac{A_c}{L} \quad (3-43)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot \frac{\overline{\langle \alpha \rangle}}{(\tau\alpha)_n} \cdot \bar{H}_T N \cdot \frac{A_c}{L} \quad (3-44)$$

onde  $F_R U_L$  e  $F_R (\tau\alpha)_n$  são parâmetros da eficiência da placa coletora, obtidos experimentalmente;  $\frac{F'_R}{F_R}$  é um fator de correção para quando houver trocado de calor,  $\frac{\overline{\langle \alpha \rangle}}{(\tau\alpha)_n}$  a proporção da média mensal em relação a incidência normal do produto transmitância-absortância da superfície coletora,  $T_{ref}$  uma temperatura de referência derivada empiricamente,  $\bar{T}_a$  a média mensal da temperatura ambiente,  $\bar{H}_T$  a média mensal da radiação diária incidente na superfície coletora,  $N$  a quantidade de dias

no mês,  $A_c$  a área da placa coletora e  $L$  a demanda mensal total de energia requerida.

Uma vez calculadas as frações solares mensais, para calcular a fração solar anual do sistema, basta somar a contribuição energética solar mensal e dividi-la pela demanda anual total de energia requerida, conforme equação 3-45.

$$F = \frac{\sum f_i L_i}{\sum L_i} \quad (3-45)$$

Para sistemas de aquecimento solar de água, torna-se necessário ainda apresentar os fatores de correção que afetam o parâmetro  $X$ . Estas correções procuram compensar o efeito da variação do volume do reservatório térmico e o efeito das diferenças de temperatura impostas nas condições de consumo.

Neste contexto, a primeira correção deve-se ao fato do método *f-chart* ter sido desenvolvido assumindo um padrão de 75 litros de volume do reservatório para cada metro quadrado de coletor instalado. Desta forma, quando a intenção é calcular a fração solar de um sistema de diferentes dimensões, é necessário multiplicar o fator  $X$  por um fator de correção do tamanho do reservatório,  $X_{c1}$ , conforme definido na equação 3-46,

$$\frac{X_{c1}}{X} = \left( \frac{V}{75.A} \right)^{-0,25} \quad (3-46)$$

de modo que o intervalo  $0,5 \leq \left( \frac{V}{75.A} \right) \leq 4,0$  seja satisfeito, onde  $V$  e  $A$  são os atuais volume e área do reservatório, respectivamente.

Semelhantemente, a segunda correção é necessária devido a outra particularidade do método. O *f-chart* foi desenvolvido considerando a necessidade de aquecimento simultâneo da água e do ar. Uma vez que a intenção seja atender unicamente a demanda de água quente de uma residência, é necessário multiplicar o fator  $X$  por um

fator de correção do aquecimento de água,  $X_{c2}$ , conforme definido na equação 3-47.

$$\frac{X_{c2}}{X} = \frac{11,6 + 1,18T_w + 3,86T_m - 2,32\bar{T}_a}{100 - \bar{T}_a} \quad (3-47)$$

Onde  $T_w$  é a temperatura desejável da água quente e  $T_m$  a temperatura da água que chega ao sistema pela rede de abastecimento.

O f-chart é o último de três métodos aqui apresentados para estimar a economia de energia e, por conseguinte, os impactos associados, decorrentes da utilização de sistemas de aquecimento solar nas residências brasileiras. Dentro das considerações expostas, referentes as particulares de cada método, estes podem finalmente ser utilizados com a finalidade aqui proposta.

## 4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Em um primeiro instante deste trabalho, foram abordados alguns conceitos fundamentais para o seu desenvolvimento, os quais estão relacionados ao processo térmico dos sistemas de aquecimento solar de água e os principais aspectos sobre sua introdução nas residências. Posteriormente, estabeleceram-se os métodos de simulação que seriam utilizados para estimar o desempenho térmico anual do sistema e a formulação de suas equações governantes. Neste último capítulo, ancorado no que já foi exposto, é apresentado uma descrição dos parâmetros da simulação, casos simulados, respectivos resultados obtidos, análises efetuadas e finalmente dos cenários de impactos da utilização da energia solar para aquecimento de água.

### 4.1 PARÂMETROS DE ENTRADA

As simulações se iniciam com a leitura dos valores dos parâmetros de entrada que são indispensáveis para sua execução. Diante disto, todos os parâmetros que foram considerados nas simulações do presente trabalho são apresentados nos subitens seguintes de acordo com sua classificação.

#### 4.1.1 Parâmetros Globais, Construtivos e Operacionais das Simulações

O primeiro conjunto de parâmetros apresentado refere-se aos parâmetros globais das simulações. Neste contexto, os parâmetros considerados, tanto para as simulações efetuadas com *software TRNSYS* como para as simulações realizadas com o algoritmo simplificado, são definidos no quadro 4.1.

Parâmetros da Simulação	Valor
Tempo Inicial	0,0
Tempo Final	8760,0
Intervalo de tempo numérico	0,1
Método de Solução dos Sistemas	
<i>TRNSYS</i>	Aproximações Sucessivas
Algoritmo Simplificado	Newton-Raphson

Parâmetros da Simulação	Valor
Método de Discretização das Equações Diferenciais	
<i>TRNSYS</i>	Euler Modificado
Algoritmo Simplificado	Crank-Nicholson

**Quadro 4.1** Parâmetros globais da simulação

Por sua vez, os parâmetros construtivos e operacionais que foram considerados para cada componente dos sistemas simulados são definidos do quadro 4.2 ao 4.7.

Parâmetros do Coletor	Símbolo	Valor
Área [m <sup>2</sup> ]	$A_c$	1,36
Coefficiente linear da curva de rendimento	$F_R(\tau\alpha)_n$	0,67
Negativo do coeficiente angular da curva de rendimento [kJ/(m <sup>2</sup> .h.K)]	$F_R U_L$	20,661
Fluxo mássico de teste [kg/(m <sup>2</sup> .h)]	$G_{teste}$	60,0
Coefficiente de modificação do ângulo de incidência	$b_o$	0,163
Inclinação [graus]	B	LAT + 10
Número de ascensores	$N_R$	8,0
Diâmetro dos ascensores [mm]	$d_R$	14,2
Diâmetro dos cabeçotes [mm]	$d_H$	27,0
Comprimento dos cabeçotes [m]	$H$	0,98
Número de nós assumidos na placa	$N_x$	20,0
Distância entre a entrada e saída da placa [m]	$H_c$	0,82
Distância entre a entrada da placa e saída do reservatório térmico [m]	$H_o$	1,0
Diâmetro do tubo de entrada [mm]	$d_i$	15,0
Comprimento do tubo de entrada [m]	$L_i$	1,67
Número de joelhos no tubo de entrada	$NB_1$	4,0
Coefficiente de transferência de calor no tubo de entrada e isolamento [kJ/(m <sup>2</sup> .h.K)]	$U_i$	1,5
Diâmetro do tubo de saída [mm]	$d_o$	19,0
Comprimento do tubo de saída [m]	$L_o$	0,3
Número de joelhos na saída	$NB_2$	4,0
Coefficiente de transferência de calor no tubo de saída [kJ/(m <sup>2</sup> .h.K)]	$U_o$	1,5

**Quadro 4.2** Parâmetros Construtivos e Operacionais do Coletor

<b>Parâmetros do Reservatório Acoplado</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Modo de posicionamento do retorno do coletor	-	Fixo
Volume [l]	$V_t$	90,5
Altura [m]	$H_t$	0,39
Proporção do Diâmetro pela Altura	$D_o/L_o$	0,5
Altura do retorno do coletor [m]	$H_R$	0,23
Configuração do reservatório	-	Horizontal
Coefficiente global de transferência de calor	$(UA)_{RT}$	3,8
Proporção do isolamento	$r_i$	1,0
Temperatura Inicial	$T_1$	50,0
Potência Máxima da resistência no interior	$Q_{aux-max}$	6,8
Altura da resistência elétrica interna	$H_{aux}$	0,195
Altura do termostato	$H_{th}$	0,205
Temperatura desejada para acionamento da energia auxiliar [°C]	$T_{set}$	55,0
Histerese do termostato	$\Delta T_{db}$	Desativado
Espessura do Isolante térmico [cm]	$e_R$	5,0
Condutividade térmica do Isolante [W/(m.K)]	$k_R$	0,04

**Quadro 4.3** Parâmetros Construtivos e Operacionais do Reservatório

<b>Parâmetros do Reservatório de Backup</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Modo de posicionamento do retorno do coletor	-	Fixo
Volume [l]	$V_B$	70,0
Proporção do Diâmetro pela Altura	$D_o/L_o$	0,5
Coefficiente de perdas térmicas [kJ/(h.m <sup>2</sup> .K)]	$(UA)_B$	3,5
Altura do tanque [m]	$H_B$	0,35
Temperatura desejada no interior do tanque [°C]	$T_{set,B}$	55,0
Histerese do termostato	$\Delta T_{db}$	desativado
Potência Máxima da resistência [kW]	$Q_{aux-max}$	6,8
Número de Nodos	$N$	1,0
Temperatura Inicial [°C]	$T_1$	50,0
Espessura do Isolante Térmico [cm]	$e_{R,B}$	5,0
Condutividade térmica do Isolante [W/(m.K)]	$k_{R,B}$	0,04

**Quadro 4.4** Parâmetros Operacionais do Reservatório de Backup

<b>Parâmetros do chuveiro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Potência máxima de aquecimento [kW]	$Q_{aux-max}$	6,8
Calor específico do fluido [kJ/(kg.K)]	$c_p$	4,19
Coefficiente global de perdas de calor [kJ/(h.K)]	$(UA)_{SH}$	0,0
Eficiência do dispositivo	$\eta_{SH}$	0,95
Temperatura desejada [°C]	$T_{set,SH}$	40,0

**Quadro 4.5** Parâmetros Construtivos e Operacionais do Chuveiro Elétrico

<b>Parâmetros do Processador</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Modelo de radiação no plano inclinado	-	Perez
Modo de rastreamento do sol	-	Fixo
Refletância do chão	$\rho_g$	0,2
Inclinação da Superfície [graus]	$\beta$	Latitude + 10
Azimute da superfície [graus]	$\gamma_s$	0,0

**Quadro 4.6** Parâmetros Operacionais do Processador de Radiação Solar

<b>Parâmetros do Fluido</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Calor específico [kJ/(kg.K)]	$c_p$	4,19
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$	992,2
Coefficiente de condutividade térmica [kJ/(h.m.K)]	$k_w$	2,27
Temperatura de Ebulição [°C]	$T_{boil}$	100,0

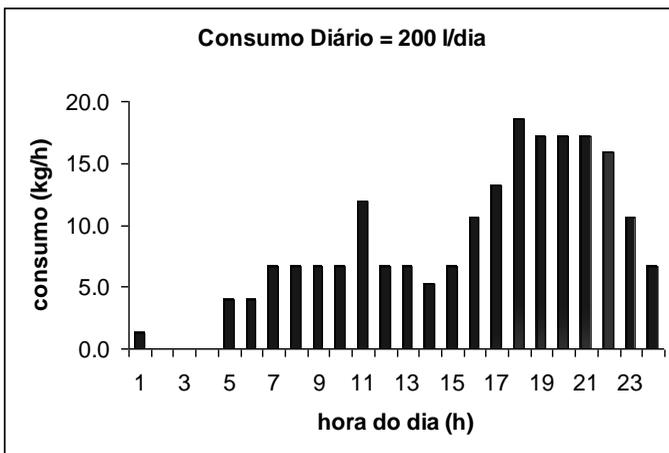
**Quadro 4.7** Parâmetros do fluido de trabalho

Uma vez definidos os parâmetros globais e os parâmetros construtivos e operacionais de cada componente, conforme foi apresentado neste item, torna-se necessário ainda determinar dois parâmetros temporais da simulação: o perfil de distribuição temporal do consumo de água quente em uma residência e a essência dos dados meteorológicos do ambiente de operação do sistema de aquecimento solar.

#### 4.1.2 Perfil de Consumo de Água Quente

Em uma simulação transiente, é conveniente que se use um perfil de consumo de água quente que também varie no decorrer do tempo. No entanto, não existem métodos generalizados para estimar essa dependência temporal, uma vez que seriam necessárias informações detalhadas sobre a demanda energética de cada domicílio em particular.

Diante disto, Salazar (2004), utilizando dados de um experimento de escala no qual durante um determinado período de meses o consumo de água quente foi monitorizado, propôs como parte de sua dissertação de mestrado, um perfil de distribuição de consumo diário que é estatisticamente válido para o propósito da presente simulação. Portanto, tal perfil é utilizado para estabelecer uma distribuição temporal padrão do consumo de água quente sob o qual o sistema de aquecimento solar simulado é submetido. A distribuição normalizada do consumo diário de água quente utilizado é então apresentada na figura 4.1.



**Figura 4.1** Consumo total diário de água quente por residência

Assim como para o perfil de água quente consumida, os dados meteorológicos também apresentam uma distribuição temporal que deve ser considerada em uma simulação detalhada.

#### 4.1.3 Dados Meteorológicos

A fim de considerar a variabilidade das condições ambientais durante um ano de operação, dados horários correspondentes ao ano meteorológico típico (TMY) para cada local de operação do sistema solar são utilizados na presente simulação. O uso de tais dados irá levar em consideração a variabilidade das condições de contorno do

problema, prevenindo o sistema de atingir um estado de regime permanente.

Neste contexto, a base de dados *SWERA* dispõe de dados horários no formato TMY para as seguintes cidades brasileiras:

#### **Norte**

- Belém;
- Boa Vista;
- Jacareacanga;
- Manaus;
- Porto Nacional;
- Porto Velho;

#### **Nordeste**

- Fortaleza;
- Petrolina;
- Recife;
- Salvador;

#### **Centro-Oeste**

- Brasília;
- Campo Grande;
- Cuiabá;

#### **Sudeste**

- Rio de Janeiro;
- São Paulo;
- Belo Horizonte;

#### **Sul**

- Curitiba;
- Florianópolis;
- Santa Maria;

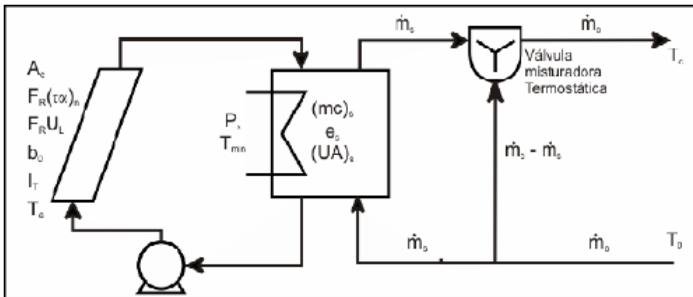
Ao todo são vinte cidades, onde, todos os casos simulados no presente trabalho serão avaliados em cada uma destas.

## **4.2 DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS**

No sentido de estimar o desempenho térmico dos sistemas de aquecimento solar de água doméstico no Brasil, quatro casos distintos foram simulados conforme os métodos apresentados no capítulo anterior. Dentre estes, os três primeiros casos foram simulados utilizando o software *TRNSYS* e diferem entre si na configuração dos componentes do sistema. Já o quarto caso foi simulado utilizando o algoritmo simplificado, e difere dos demais quanto a seu modo de acionamento da energia auxiliar. A seguir, a configuração de cada um dos casos é apresentada individualmente.

#### 4.2.1 Caso I: Aquecedor Solar + Resistência Interna no Reservatório

No primeiro caso, o sistema físico é composto por um aquecedor solar com reservatório térmico acoplado e um misturador termostático. O aquecimento auxiliar no sistema é feito a partir de uma resistência elétrica instalada no centro do reservatório térmico conjugado ao coletor solar. O acionamento da resistência elétrica ocorre em função de uma temperatura mínima que se deseja que seja mantida no interior do reservatório. Desta forma, sempre que a temperatura no interior do reservatório for menor que a temperatura desejada, a energia auxiliar é então acionada até que a condição imposta seja satisfeita. A figura 4.2 ilustra esquematicamente o sistema referido.



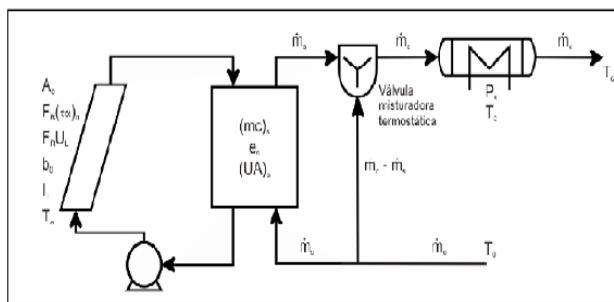
**Figura 4.2** Esquema ilustrativo do Aquecedor Solar com Resistência no Reservatório

O método de simulação do desempenho térmico empregado para este caso foi a simulação detalhada, com a utilização do *software TRNSYS* e dos dados meteorológicos horários disponíveis na base *SWERA*. O sistema é então simulado para as vinte cidades disponíveis, conforme mencionado no item anterior.

#### 4.2.2 Caso II: Aquecedor Solar + Aquecimento de passagem

Neste segundo caso, o sistema físico é composto por um aquecedor solar com reservatório térmico acoplado, um misturador termostático e um aquecedor de passagem. Diferentemente do primeiro caso, neste, a resistência elétrica instalada no interior do reservatório está desativada. Portanto, o aquecimento auxiliar no sistema é feito unicamente através do aquecedor de passagem que compõe o sistema. Tal aquecedor está instalado no último ponto da linha da água de

consumo e é acionado em função do mantimento de uma temperatura mínima da água de consumo. Desta forma, sempre que a temperatura da água consumida pelo usuário estiver em uma temperatura menor que aquela desejada, o aquecedor de passagem é então acionado de modo que satisfaça a condição de temperatura imposta para o consumo. A figura 4.3 ilustra esquematicamente o sistema referido.



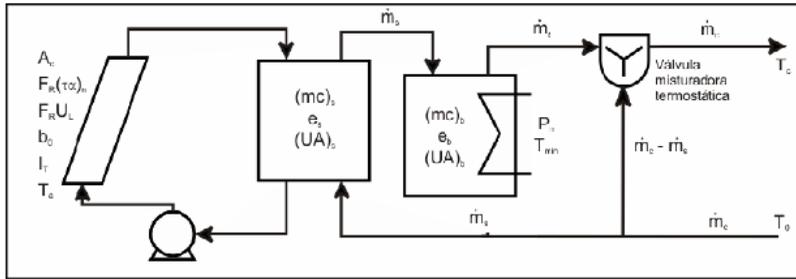
**Figura 4.3** Esquema ilustrativo do Aquecedor Solar com Chuveiro Elétrico Acoplado

O método de simulação do desempenho térmico empregado para este caso também foi a simulação detalhada, com a utilização do *software TRNSYS* e dos dados meteorológicos horários disponíveis na base *SWERA*. Sendo assim, o sistema é então simulado para as vinte cidades disponíveis.

#### 4.2.3 Caso III: Aquecedor Solar + Reservatório Extra de Backup

O terceiro caso apresenta um sistema físico composto por um aquecedor solar com reservatório térmico acoplado, um misturador termostático e um segundo reservatório térmico. Neste caso, a resistência elétrica instalada no interior do reservatório conjugado ao coletor está desativada. Por sua vez, a resistência que está instalada no interior do segundo reservatório está ativada. Desta forma, o aquecimento auxiliar no sistema opera unicamente no segundo reservatório, através do acionamento da resistência elétrica. Semelhantemente ao primeiro caso, neste, o acionamento da resistência elétrica ocorre unicamente em função de uma temperatura mínima que se deseja que seja mantida no interior do reservatório. Desta forma, sempre que a temperatura no interior do reservatório for menor que a temperatura desejada, a energia auxiliar é então acionada até que a

condição imposta seja satisfeita. A figura 4.4 ilustra esquematicamente o sistema referido.



**Figura 4.4** Esquema Ilustrativo do Aquecedor Solar com dois reservatórios

Assim como nos casos anteriores, o método de simulação do desempenho térmico empregado para este caso também foi a simulação detalhada, com a utilização do *software TRNSYS* e dos dados meteorológicos horários disponíveis na base *SWERA*. Sendo assim, o sistema é também simulado para as vinte cidades disponíveis.

#### 4.2.4 Caso IV: Aquecedor Solar + Reservatório Extra de Backup (com Acionamento Restrito ao Horário da Madrugada)

O quarto caso apresenta praticamente a mesma composição e configuração do caso III. Todavia, o modo de acionamento da energia auxiliar que opera no segundo reservatório é diferente. Neste quarto caso, diferentemente de todos os outros casos onde o acionamento da energia auxiliar se dava em função de uma temperatura desejada, o acionamento da energia auxiliar ocorre somente no horário da madrugada, compreendido entre as 0:00 e 6:00 horas de cada dia. Desta forma, a resistência elétrica é acionada apenas durante este horário, no sentido de atender satisfatoriamente toda demanda de consumo diário.

Uma vez que esta particularidade quanto ao horário de acionamento da energia auxiliar a princípio não possa ser representada no *TRNSYS*, o método de simulação do desempenho térmico empregado para este caso foi a simulação detalhada através do algoritmo simplificado e dos dados meteorológicos horários disponíveis na base *SWERA*.

### 4.3 RESULTADOS

O desempenho térmico anual de todos os casos de sistemas de aquecimento solar de água que foram simulados no presente trabalho é representado em termos da fração solar mensal,  $f$ , que pode ser definida como:

$$f = 1 - \frac{\int_{t_0}^t Q_{aux} dt}{\int_{t_0}^t \dot{m}_{co} c_p (T_{set} - T_{rede}) dt} \quad (4.1)$$

onde  $T_{set}$  é a temperatura desejada da água para o banho, assumida como sendo 40°C. Desta forma, uma fração solar igual a um significaria então que toda energia requerida pela demanda de consumo foi fornecida pelo coletor solar. Sob este conceito, os resultados obtidos são expostos nas figuras abaixo para todos os meses do ano e a fração solar média anual representada pelo índice 13.

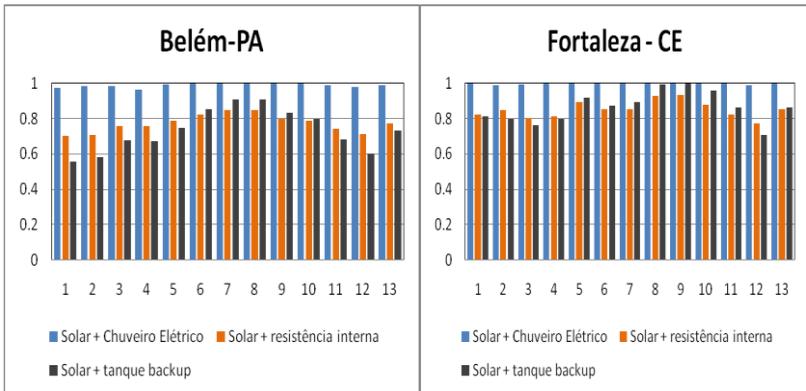
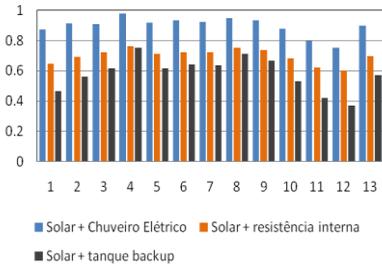
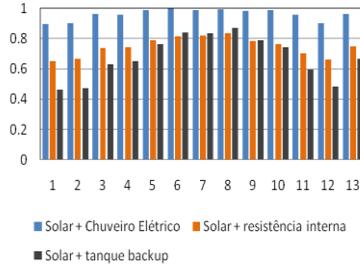
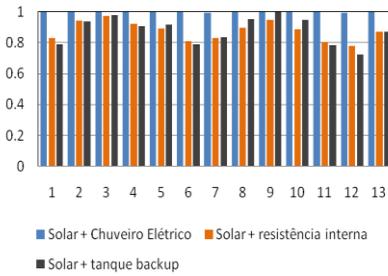
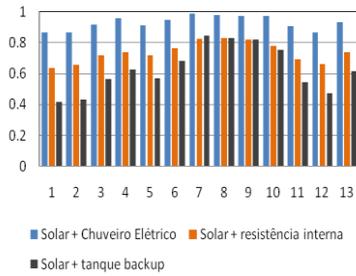
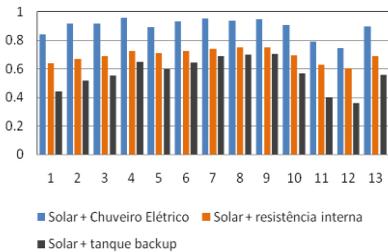
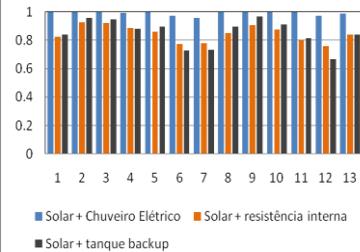
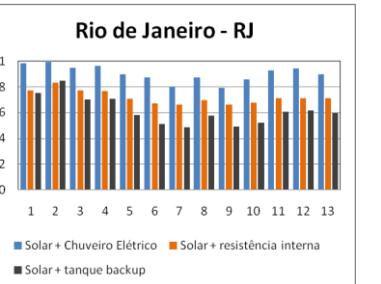
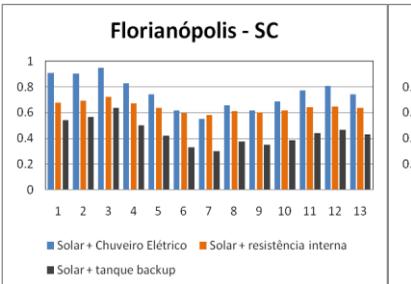
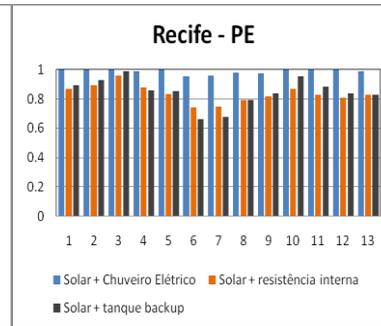
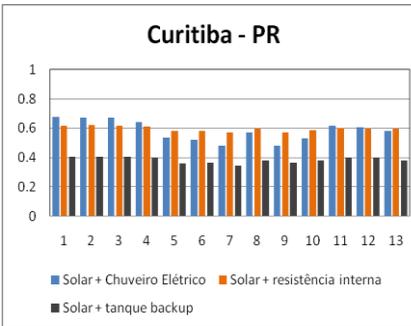
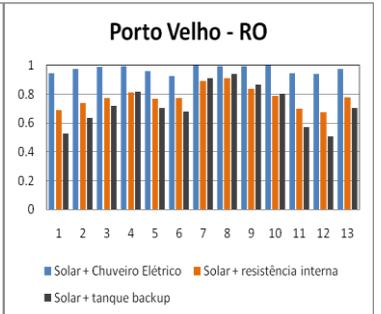
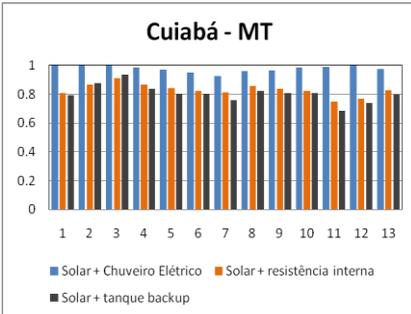
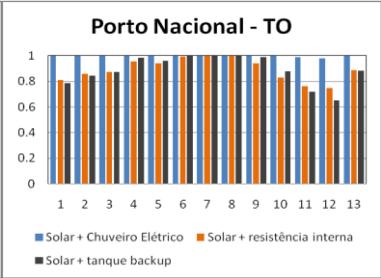
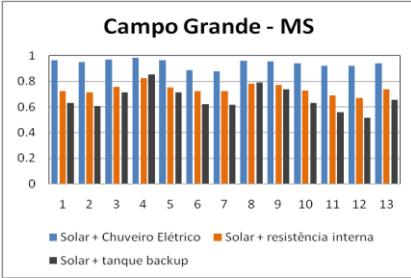
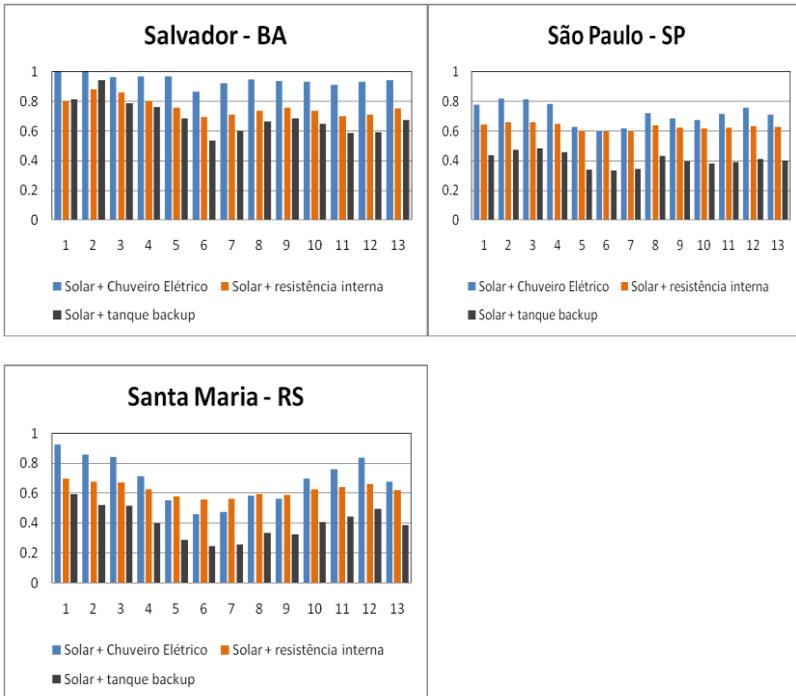


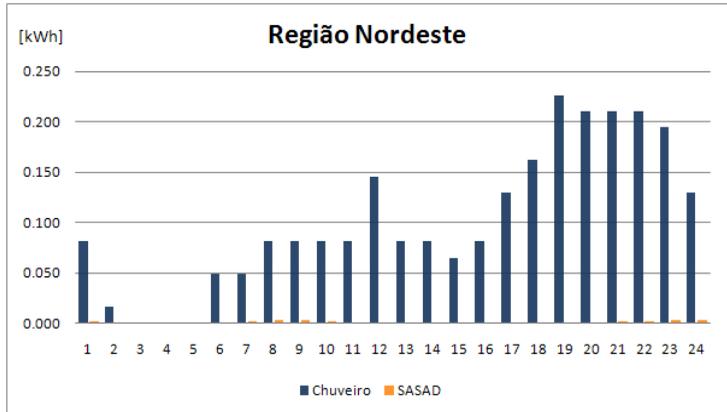
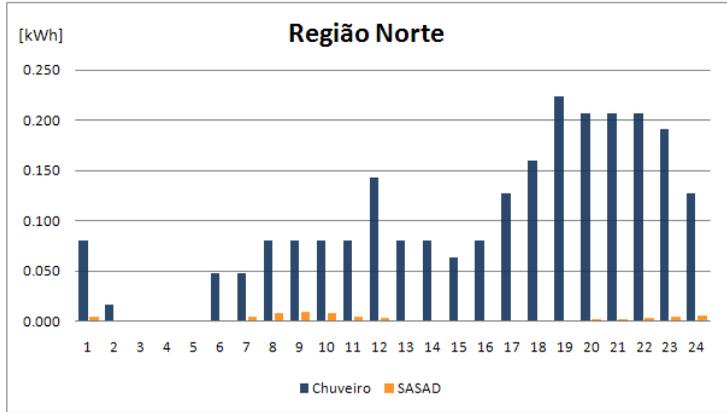
Figura 4.1

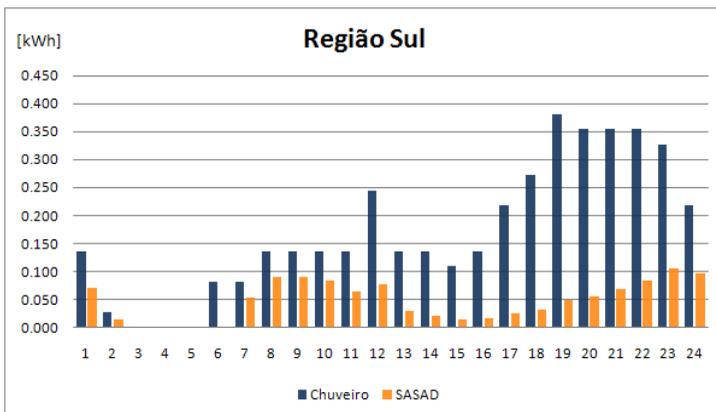
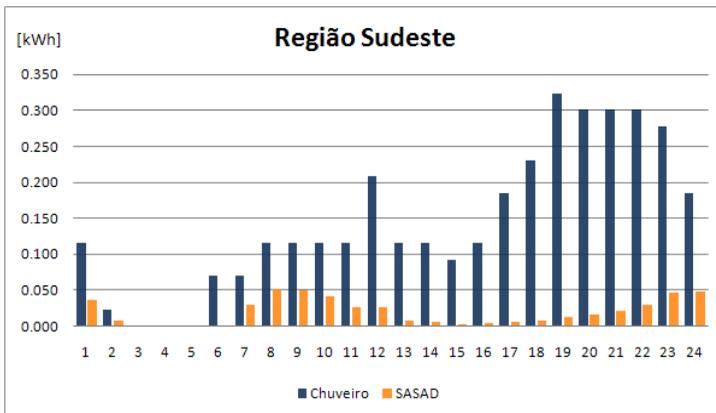
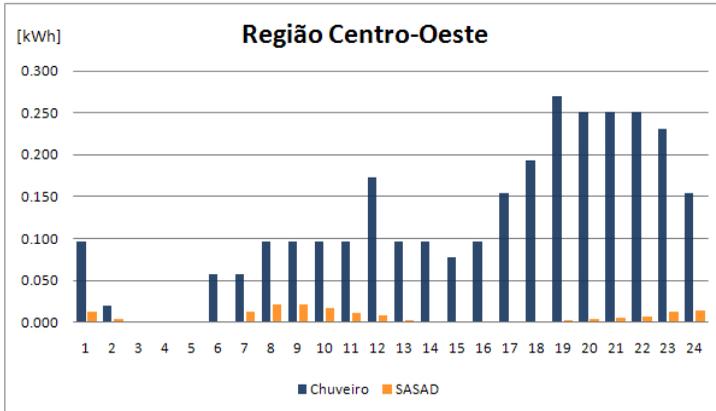
**Belo Horizonte - MG****Jacareacanga - PA****Boa Vista - RR****Manaus - AM****Brasília - DF****Petrolina - PE**



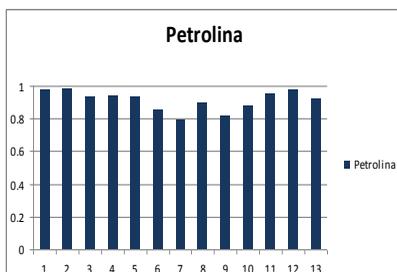
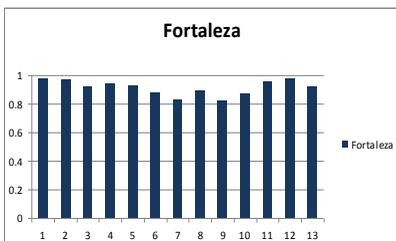
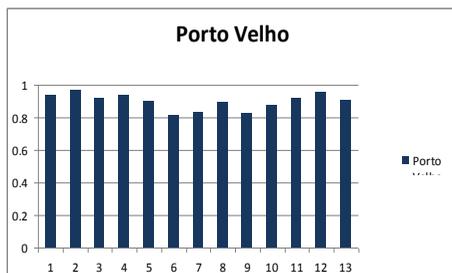
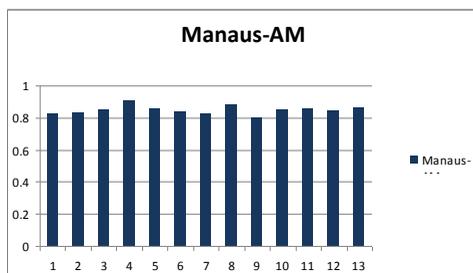
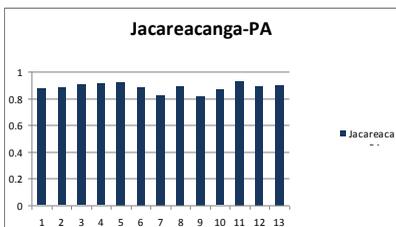
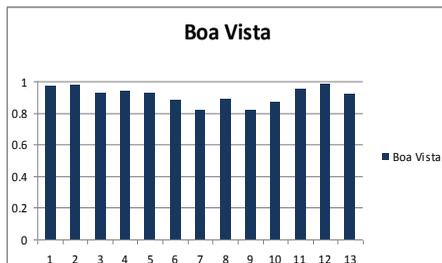
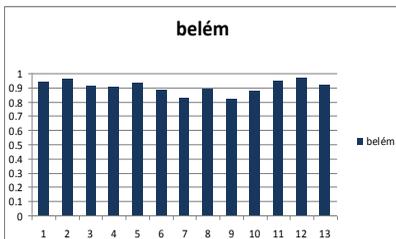


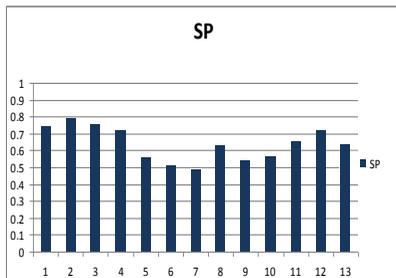
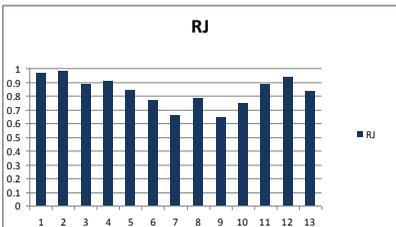
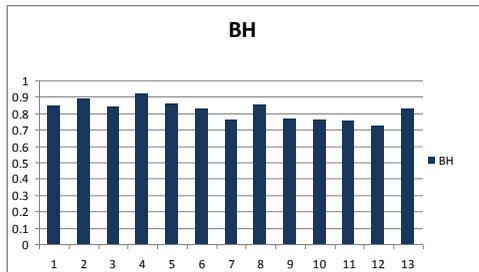
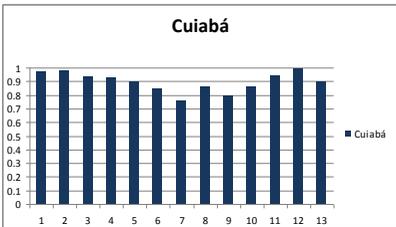
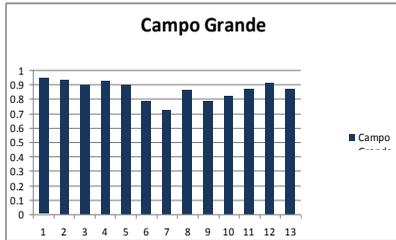
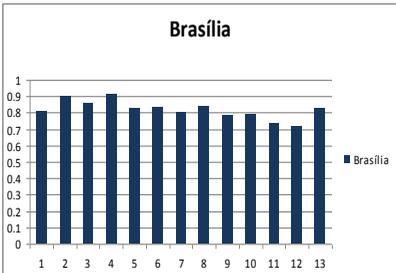
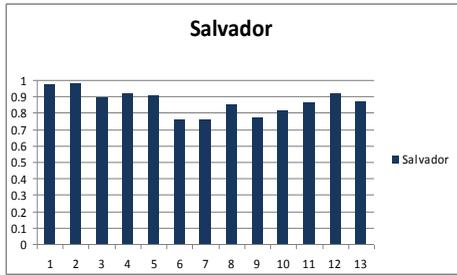
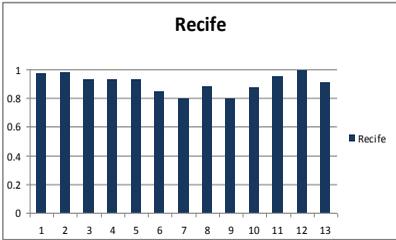
Por se tratar de uma simulação transiente em base horária, além das frações solares mensal e anual, foi possível ainda estimar a fração solar média horária em cada cidade. Desta forma, obtem-se ainda uma estimativa do impacto na supressão do pico de demanda. Tais resultados são apresentados nas figuras abaixo, para cada uma das cinco regiões do Brasil.

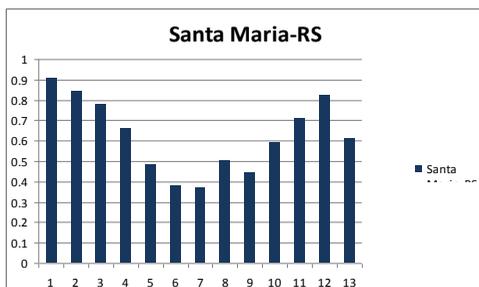
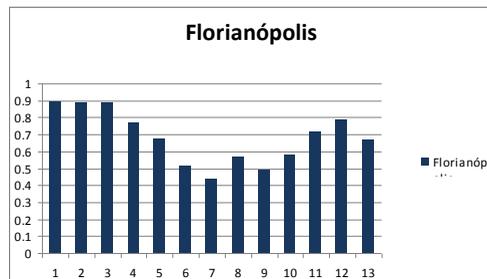
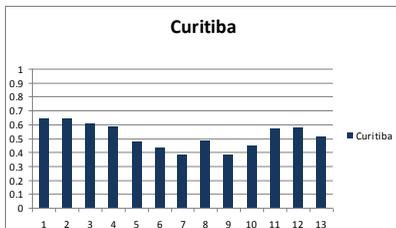




Para o algoritmo simplificado, os resultados também são obtidos sob o conceito da fração solar e são apresentados nas figuras seguintes.







Uma vez que no algoritmo simplificado a utilização da energia auxiliar está restrita ao horário de madrugada, a supressão do pico de demanda neste caso é total, dispensando a necessidade de estimar a fração solar média diária para esta avaliação, conforme foi feito para o caso da simulação realizada com o TRNSYS.

#### 4.4 CENÁRIOS DE IMPACTOS ECONÔMICOS

Uma vez obtidos os valores da fração solar mensal e anual para cada cidade considerada no presente trabalho, conforme apresentado no item anterior, e ainda estimada a supressão no pico de demanda, é possível agora realizar também uma análise econômica a fim de avaliar a viabilidade da introdução dos sistemas solares nos locais referidos. As cidades foram agrupadas de acordo com suas respectivas regiões, a fim de facilitar a visualização dos resultados.

A análise é efetuada sob a perspectiva do consumidor residencial de média renda e da concessionária de energia elétrica. Para o consumidor os parâmetros avaliados são tempo de retorno do investimento na introdução do sistema solar na residência, taxa interna de retorno deste investimento (T.I.R) e a economia financeira total

durante o ciclo de operação do sistema, em relação ao sistema contemplando apenas o uso do chuveiro elétrico convencional (LCS). Já para a concessionária de energia elétrica, avalia-se as economias com custos marginais de expansão e os possíveis custos com investimentos no sistema solar para evitar o pico.

Os parâmetros citados são então avaliados no contexto de seis cenários possíveis de se estabelecer e que influenciam diretamente no processo de viabilidade econômica dos equipamentos solares para ambas as partes.

#### 4.4.1 Cenário 01: Tarifa única diária e sem subsídio do equipamento solar

Neste primeiro cenário, é assumido que o valor da tarifa de energia elétrica cobrado pela concessionária de energia elétrica é única durante todos os horários do dia para a classe residencial de média renda, de modo que o horário de consumo não interfere no custo total. Tal tarifa é diferenciada para cada estado brasileiro e está sujeita ainda a aplicação do imposto estadual de ICMS. Desta forma, alguns estados irão apresentar um custo final do consumo de energia bem diferente de outros. Neste contexto, a tabela 4.1 discrimina os valores das tarifas e ICMS praticados na presente análise para cada cidade simulada.

**Tabela 4.1** Tarifas de Energia Elétrica Estabelecidas pela ANEEL em 2010

Cidades do Norte	Tarifa (R\$/kWh)	ICMS (%)	Custo Final ao Consumidor (R\$/kWh)
Belém-PA	0,3699	25	0,4624
Jacareacanga-PA	0,3701	25	0,4626
Boa Vista-RR	0,2687	17	0,3144
Manaus – AM	0,3043	25	0,3803
Porto Nacional-TO	0,4181	25	0,5226
Porto Velho-RO	0,3512	17	0,4109
Cidades do Nordeste	Tarifa (R\$/kWh)	ICMS (%)	Custo Final ao Consumidor (R\$/kWh)
Fortaleza-CE	0,4020	17	0,4703
Petrolina-PE	0,3201	25	0,4001
Recife-PE	0,3201	25	0,4001
Salvador-BA	0,3486	25	0,4357

Cidades do Centro-Oeste	Tarifa (R\$/kWh)	ICMS (%)	Custo Final ao Consumidor (R\$/kWh)
Brasília-DF	0,2800	21	0,3388
Campo Grande-MT	0,3635	20	0,4362
Cuiabá	0,3648	25	0,4560
Cidades do Sudeste	Tarifa (R\$/kWh)	ICMS (%)	Custo Final ao Consumidor (R\$/kWh)
Belo Horizonte-MG	0,3762	30	0,4891
Rio de Janeiro-RJ	0,3177	25	0,3971
São Paulo-SP	0,2965	25	0,3706
Cidades do Sul	Tarifa (R\$/kWh)	ICMS (%)	Custo Final ao Consumidor (R\$/kWh)
Curitiba-PR	0,3000	27	0,3800
Florianópolis-SC	0,3250	25	0,4062
Santa Maria-RS	0,3164	25	0,3955

Além da tarifa única durante o dia, considera-se também neste cenário que o consumidor não recebe nenhum subsídio por parte da concessionária de energia elétrica para facilitar o investimento inicial no sistema de aquecimento solar. Sendo assim, assume-se que este arca totalmente com os custos provenientes da aquisição e manutenção do sistema durante todo seu ciclo de operação. A tabela 4.2 discrimina os valores praticados na presente análise para o sistema de aquecimento solar de água.

**Tabela 4.2** Dados econômicos para o sistema de aquecimento solar

Dados Econômicos do SASAD	Valor
Aquisição e Instalação	R\$ 1.600,00
Manutenção	1,0% ao ano do total investido
Vida Útil do Equipamento	20 anos

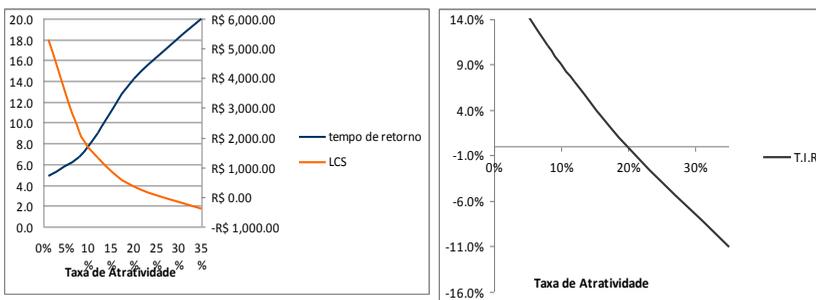
Todos os valores apresentados nas tabelas 4.1 e 4.2 são correntes, sendo estes levantados no final de 2010 para efetuar a análise econômica. Apesar de muitos valores estarem determinados em dólares americanos, optou-se por adotar no presente trabalho o Real, a moeda nacional, para base dos cálculos, no sentido de melhor representar a realidade do mercado brasileiro.

Diante dos dados que foram expostos, o cenário proposto pode então ser analisado economicamente para consumidor e para a concessionária de energia elétrica. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.3, considerando primeiramente a perspectiva do consumidor.

**Tabela 4.3** Cenário Econômico para os consumidores das cidades simuladas

Cenário para os consumidores	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Tempo de Retorno (Anos)	6,7	5,8	4,7	4,3	5,0
Taxa Interna de Retorno (%)	11,1	11,2	14,5	16,5	13,6
LCS (R\$)	2,208.5	1,963.6	2,484.7	2,820.0	2,337.4

Para o levantamento dos resultados apresentados na tabela 4.1 foi utilizado uma taxa de desconto de 8,0% a.a., baseado no rendimento oferecido pelas poupanças nos últimos 10 anos. Tal valor representa a taxa mínima de atratividade do investimento, que corresponde ao mínimo que o investidor, neste caso o consumidor, se propõe a ganhar ao investir seu capital. Por se tratar de uma variável fundamental para qualquer análise econômica, afetando diretamente os resultados obtidos, foi feita ainda uma análise de sensibilidade desses parâmetros a taxas de atratividade comumente utilizadas: 1%, 8%, 12% e 35%. Tal resultado é apresentado na figura 4.1.



**Figura 4.1** Análise de Sensibilidade para região Norte

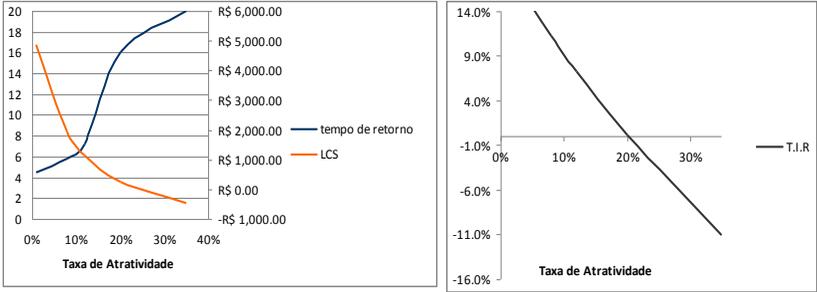


Figura 4.2 Análise de Sensibilidade para região Nordeste

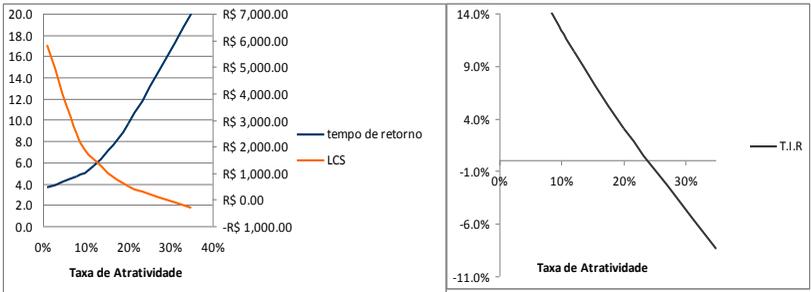
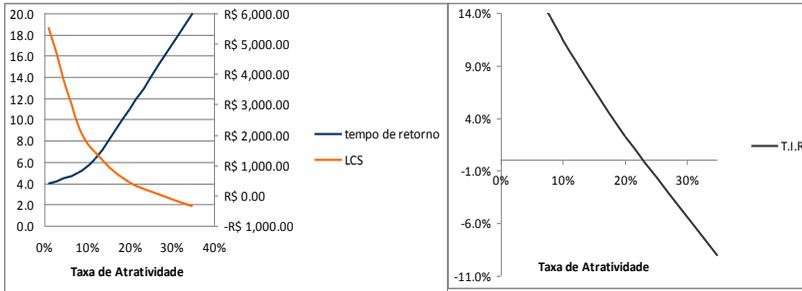


Figura 4.3 Análise de Sensibilidade para região Centro-Oeste



Figura 4.4 Análise de Sensibilidade para região Sudeste



**Figura 4.5** Análise de Sensibilidade para região Sul

Por outro lado, na análise sob a perspectiva da concessionária de energia elétrica, observa-se que, uma vez que não foi feito nenhum tipo de investimento financeiro por sua parte neste cenário, esta só apresenta ganhos referentes a energia conservada anualmente e evitada no horário de pico, de modo que o custo pago pela concessionária para evitar o pico é zero, dispensando a necessidade de cálculo de tempo de retorno. Neste contexto, considerando-se um custo marginal de expansão da ordem de R\$ 2.000 por cada kW instalado e a potência evitada no horário de ponta para cada região do Brasil, conforme apresentado nas figuras anteriores, estima-se então a economia obtida pela concessionária de energia elétrica por cada residência que utilize um sistema de aquecimento solar, ao invés de um chuveiro elétrico, como meio de aquecimento de água para o banho. Tal resultado é apresentado na tabela 4.4.

**Tabela 4.4** Cenário Econômico para as concessionárias de energia elétrica

Cenário para o Setor Elétrico	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Ganho por SASAD instalado (R\$)	485,30	493,12	582,67	671,49	703,46

Tal economia serve como critério para estimativa do subsídio que a concessionária poderia conceder ao usuário, uma vez que além deste ganho por cada chuveiro elétrico substituído a concessionária ainda recebe como benefício a redução dos custos marginais com expansão e melhoria do serviço de fornecimento. Desta forma, a concessionária de energia de energia elétrica poderia subsidiar parte do investimento assumido pelo consumidor, repassando os ganhos decorrentes das economias com custo marginal de expansão, de modo que incentivasse a difusão dos equipamentos no país e conseqüente redução no custo

marginal de fornecimento. Feito isto, tanto o consumidor quanto a concessionária de energia sairiam ganhando.

#### 4.4.1 Cenário 02: Tarifa única diária e com subsídio do equipamento solar

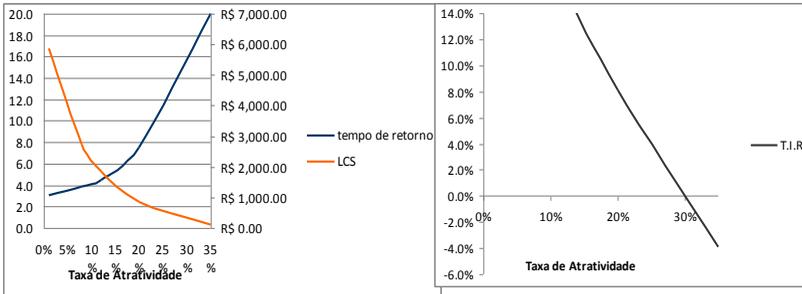
O segundo cenário avaliado no presente trabalho apresenta a mesma prática tarifária do cenário anterior, onde o valor da tarifa de energia elétrica cobrado pela concessionária de energia elétrica independe do horário de consumo. Todavia, no que se refere ao custo de investimento no sistema de aquecimento solar, neste cenário supõe-se que consumidor receba como subsídio da concessionária de energia elétrica um valor igual a economia total atingida com custos marginais de expansão, provenientes da substituição do chuveiro elétrico, conforme apresentado na tabela 4.4.

Desta forma, subtraindo o valor fornecido pela concessionária do investimento inicial total do equipamento solar (aquisição e instalação) um novo cenário econômico é estabelecido tanto para o consumidor quanto para a concessionária. Tal cenário é apresentado na tabela 4.5.

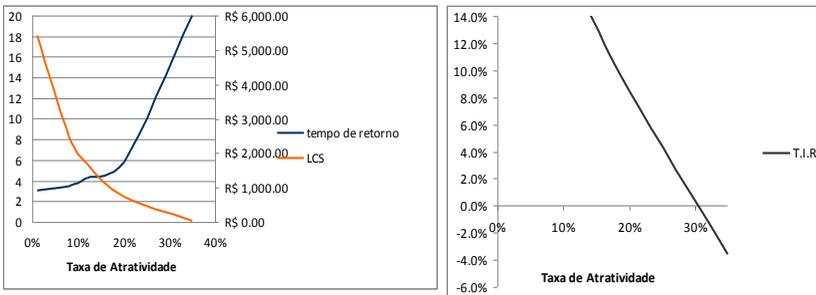
**Tabela 4.5** Cenário Econômico para os consumidores das cidades simuladas

Cenário para os consumidores	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Tempo de Retorno (Anos)	3,8	3,5	2,7	1,7	2,0
Taxa Interna de Retorno (%)	20,2	20,5	28,0	34,9	31,4
LCS (R\$)	2.741,4	2.505,2	3.124,5	3.557,4	3.110,9

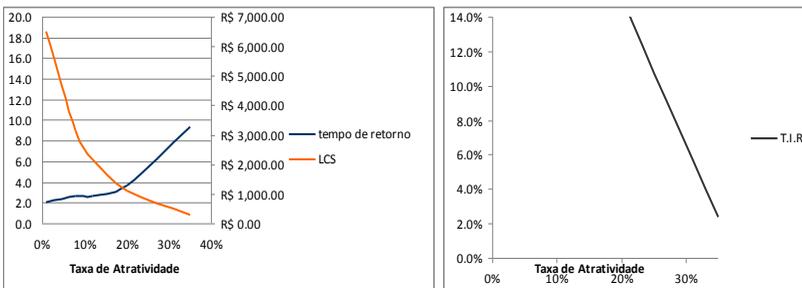
Assim como no primeiro cenário, foi também utilizado uma taxa de desconto igual a 8,0% a.a.. Logo, as figuras seguintes mostram a sensibilidade dos parâmetros a variação dessa taxa.



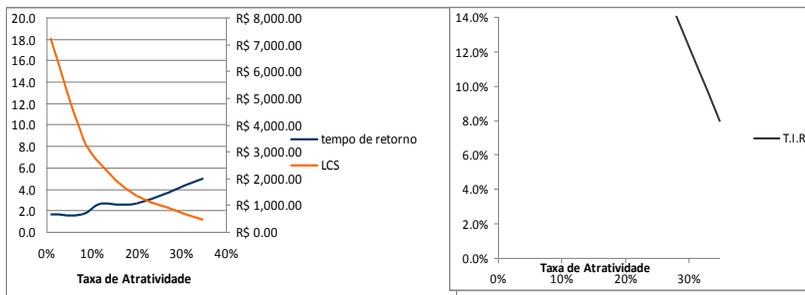
**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Norte



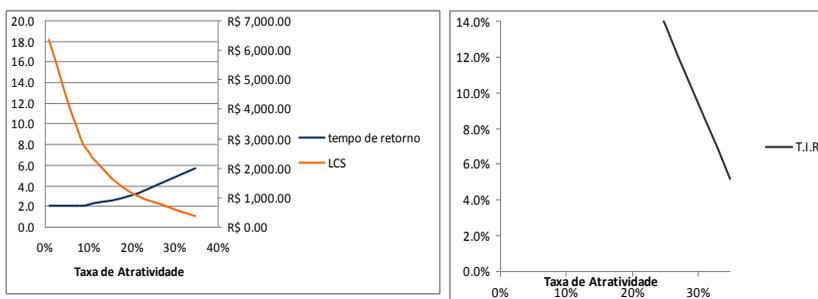
**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Nordeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Centro-Oeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Sudeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Sul

Por outro lado, para a concessionária de energia elétrica, o investimento no sentido de evitar o pico de demanda no horário de ponta seria a mesma quantia fornecida ao consumidor como forma de subsídio do investimento inicial necessário para introdução do sistema de aquecimento solar. Desta forma o custo para evitar o pico seria o mesmo custo gasto com expansão.

#### **4.4.1 Cenário 03: Tarifa diferenciada pelo horário de consumo e sem subsídio do equipamento solar**

A principal diferença deste cenário para os demais está na suposta prática tarifária adotada pela concessionária de energia elétrica. Neste cenário, é assumido que o valor da tarifa cobrada para a classe consumidora residencial irá variar em função do horário de consumo. Para tanto, serão considerados três modos: Madrugada, Ponta e Normal.

O modo definido como normal compreende a faixa de horário entre as 6:00 e 18:00, e ainda entre as 21:00 e 0:00. Durante estes horários, o valor atribuído a tarifa de energia elétrica é exatamente o

mesmo apresentado na tabela 4.1, praticado para qualquer horário do dia nos dois cenários anteriores.

Por sua vez, o modo madrugada compreende a faixa de horário entre 0:00 e 6:00. Uma vez que neste horário o consumo de energia elétrica é mínimo, supõe-se que o valor atribuído a tarifa de consumo corresponda a metade do valor atribuído a tarifa cobrada no horário normal. Além disso, supõe-se também que a tarifa cobrada neste horário seja isenta do ICMS.

Já no horário de Ponta, compreendido entre as 18:00 e 21:00, por apresentar um elevado pico de consumo, além de estar sujeita a cobrança do ICMS, supõe-se ainda que a tarifa atribuída para este horário apresente um valor correspondente ao dobro daquele atribuído a tarifa cobrada no horário normal.

Feitas essas considerações, a tabela 4.6 discrimina os valores das tarifas praticados na presente análise para cada faixa de horário determinado em cada cidade analisada.

**Tabela 4.6** Supostas Tarifas em função do horário de consumo

Cidades do Norte	Tarifa Madrugada (R\$/kWh)	Tarifa Ponta (R\$/kWh)	Tarifa Normal (R\$/kWh)
Belém-PA	0,185	0,925	0,4624
Jacareacanga-PA	0,185	0,925	0,4626
Boa Vista-RR	0,134	0,629	0,3144
Manaus – AM	0,152	0,761	0,3803
Porto Nacional-TO	0,209	1,045	0,5226
Porto Velho-RO	0,176	0,822	0,4109
Cidades do Nordeste	Tarifa Madrugada (R\$/kWh)	Tarifa Ponta (R\$/kWh)	Tarifa Normal (R\$/kWh)
Fortaleza-CE	0,201	0,941	0,4703
Petrolina-PE	0,160	0,800	0,4001
Recife-PE	0,160	0,800	0,4001
Salvador-BA	0,174	0,872	0,4357
Cidades do Centro-Oeste	Tarifa Madrugada (R\$/kWh)	Tarifa Ponta (R\$/kWh)	Tarifa Normal (R\$/kWh)
Brasília-DF	0,140	0,678	0,3388
Campo Grande-MT	0,182	0,872	0,4362
Cuiabá	0,182	0,912	0,4560

Cidades do Sudeste	Tarifa Madrugada (R\$/kWh)	Tarifa Ponta (R\$/kWh)	Tarifa Normal (R\$/kWh)
Belo Horizonte-MG	0,188	0,978	0,4891
Rio de Janeiro-RJ	0,159	0,794	0,3971
São Paulo-SP	0,148	0,741	0,3706
Cidades do Sul	Tarifa Madrugada (R\$/kWh)	Tarifa Ponta (R\$/kWh)	Tarifa Normal (R\$/kWh)
Curitiba-PR	0,150	0,762	0,3800
Florianópolis-SC	0,163	0,813	0,4062
Santa Maria-RS	0,158	0,791	0,3955

No que se refere ao investimento no sistema de aquecimento solar, considera-se neste cenário que, assim como no primeiro, não há subsídio por parte da concessionária de energia elétrica. Deste modo o consumidor arca com todos os custos de aquisição do equipamento. Portanto, os dados econômicos utilizados para o sistema de aquecimento solar são os mesmo apresentados na tabela 4.2. Por conseguinte, o cenário proposto é então determinado e apresentado na tabela 4.1.

**Tabela 4.7** Cenário Econômico para os consumidores das cidades simuladas

Cenário para os consumidores	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Tempo de Retorno (Anos)	4,8	4,5	3,7	3,0	3,0
Taxa Interna de Retorno (%)	16,0	16,2	20,3	23,5	21,4
LCS (R\$)	3.072,9	2.767,1	3.450,5	3.983,8	3.621,7

Assim como foi citado nos cenários anteriores, neste também foi utilizada uma taxa de desconto de 8,0% a.a. Sendo assim, a sensibilidade dos parâmetros obtidos em função da taxa de atratividade assumida é apresentado nas figuras seguintes.

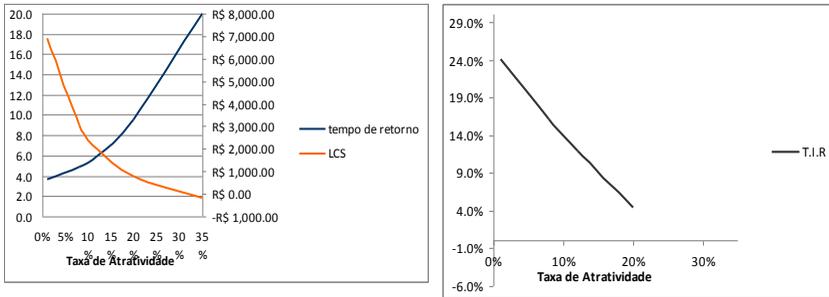


Figura 4. Análise de Sensibilidade para região Norte

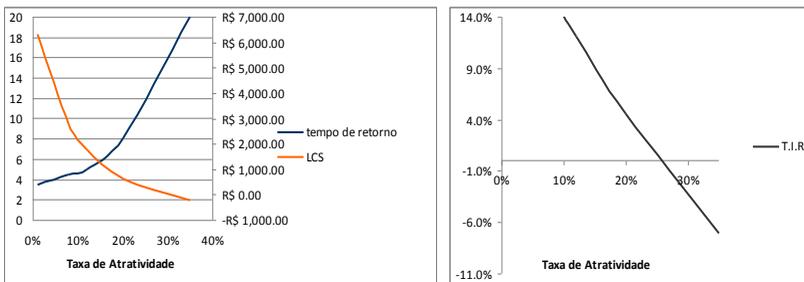


Figura 4. Análise de Sensibilidade para região Nordeste

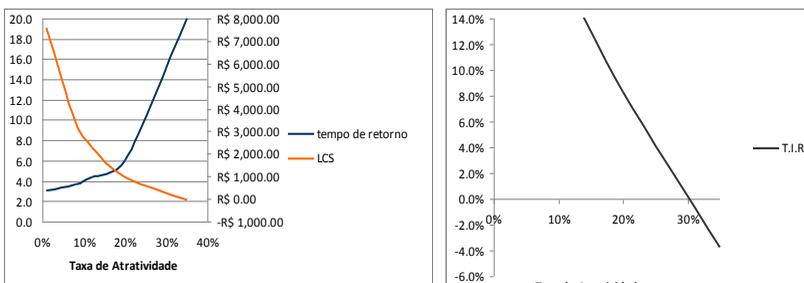
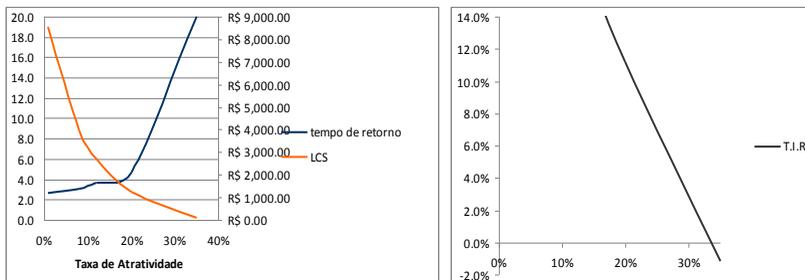
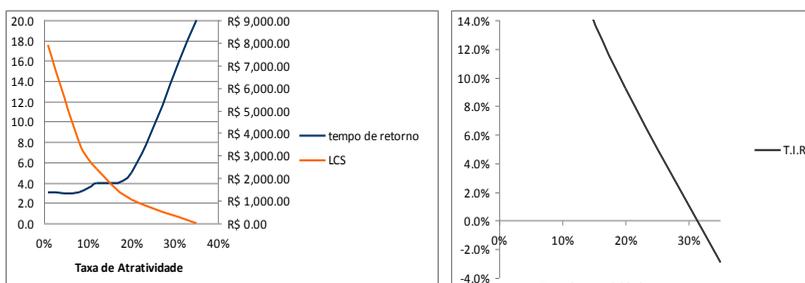


Figura 4. Análise de Sensibilidade para região Centro-Oeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Sudeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Sul

Para a concessionária o cenário atual é exatamente o mesmo determinado no primeiro cenário. Ou seja, não houve nenhum custo no sentido de subsidiar a aquisição do sistema de aquecimento solar, havendo apenas ganhos decorrentes das economias com custos de expansão, conforme foi apresentado na tabela 4.4.

#### 4.4.1 Cenário 04: Tarifa diferenciada pelo horário de consumo e com subsídio do equipamento solar

A prática tarifária assumida neste cenário é igual àquela adotada no cenário anterior, com os valores de tarifas em função do modo de horário de consumo conforme apresentado na tabela 4.1. Por outro lado, desta vez, supõe-se que a concessionária de energia elétrica resolva deslocar seus ganhos decorrentes das economias com custos marginais de expansão para o consumidor, no sentido de subsidiar parte do investimento inicial para compra do sistema de aquecimento solar.

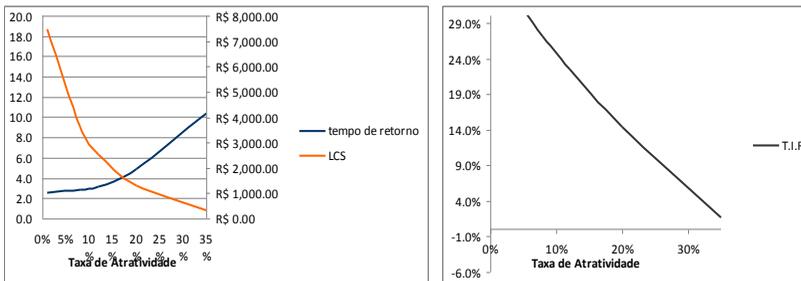
Portanto, os valores investidos pela concessionária são aqueles apresentados na tabela 4.1. Desta forma, subtraindo o valor fornecido

pela concessionária do investimento inicial total do equipamento solar (aquisição e instalação) um novo cenário econômico é estabelecido. Tal cenário é apresentado na tabela 4.2.

**Tabela 4.1** Cenário Econômico para os consumidores das cidades simuladas

Cenário para os consumidores	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Tempo de Retorno (Anos)	2,8	2,5	2,0	1,7	1,3
Taxa Interna de Retorno (%)	27,1	27,5	37,0	46,8	44,9
LCS (R\$)	3.605,9	3.308,6	4.090,3	4.721,2	4.394,2
	0	2	9	1	4

Por sua vez, a sensibilidade dos parâmetros em função da taxa de atratividade é apresentada nas figuras seguintes.



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Norte

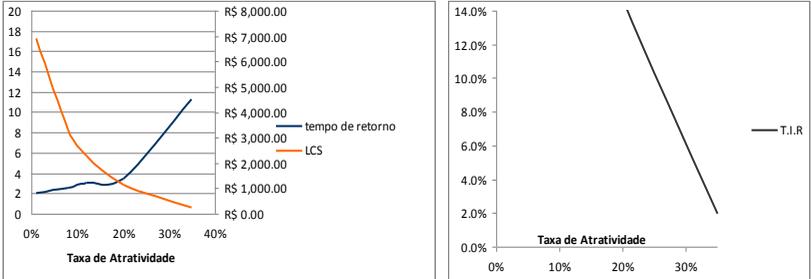


Figura 4. Análise de Sensibilidade para região Nordeste

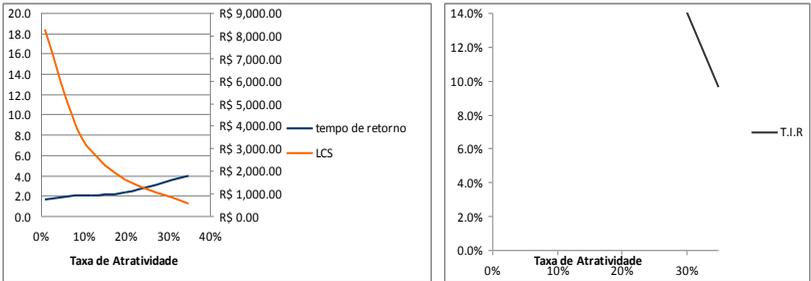


Figura 4. Análise de Sensibilidade para região Centro-Oeste

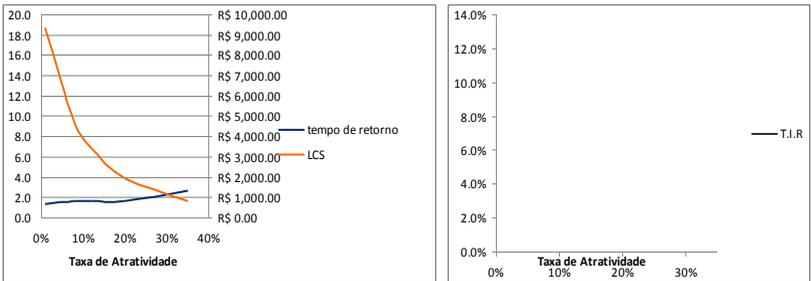
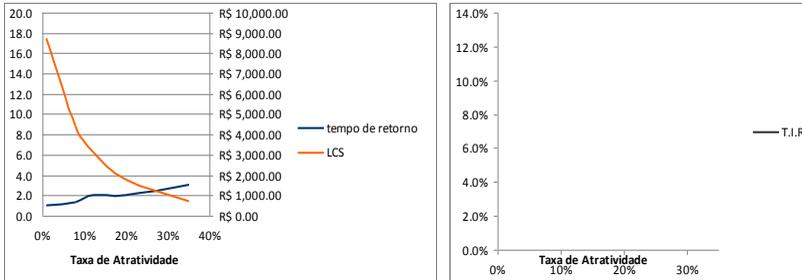


Figura 4. Análise de Sensibilidade para região Sudeste



**Figura 02** Análise de Sensibilidade para região Sul

Para a concessionária de energia elétrica este cenário apresenta os mesmos atributos do cenário 02, de modo que o valor do custo investido para evitar o pico é o mesmo valor do custo marginal com expansão.

#### **4.4.5 Cenário 05: Acionamento da Energia Auxiliar restrito a Madrugada, Tarifa diferenciada pelo horário de consumo e Sem subsídio do equipamento solar**

A prática tarifária suposta neste quinto cenário é a mesma dos cenários anteriores, onde o custo irá depender do horário de consumo. Diante desta flexibilidade de tarifa, supõe-se então uma troca do sistema de aquecimento solar utilizado, no sentido de restringir o acionamento da energia auxiliar ao horário da madrugada, onde a tarifa atribuída é significativamente menor que nos outros horários.

Para tanto, ao invés de analisar economicamente o mesmo sistema utilizado nos cenários anteriores, composto pelo aquecedor solar + chuveiro elétrico, conforme definido no item 3.1, é utilizado o sistema composto pelo aquecedor solar + reservatório de backup com horário de acionamento pré-determinado, conforme definido no item 3.4. Desta forma, todo consumo auxiliar durante a operação do sistema poderá ser tarifado pelo valor mínimo, conforme foi discriminado na tabela 4.6.

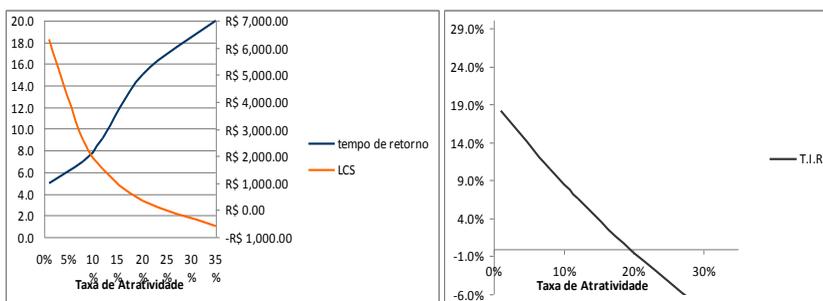
No que se refere aos custos de aquisição do sistema, considera-se que o consumidor não recebe nenhum subsídio por parte da concessionária de energia elétrica para facilitar o investimento inicial no sistema de aquecimento solar. Sendo assim, este arca totalmente com os custos de aquisição. A vida útil do sistema e os custos de manutenção são os mesmos apresentados na tabela 4.2. Todavia, o custo de aquisição do equipamento é acrescido de R\$ 400,00 referente a aquisição do segundo reservatório.

Feitas as devidas considerações o cenário proposto é então determinado e apresentado na tabela 4.8.

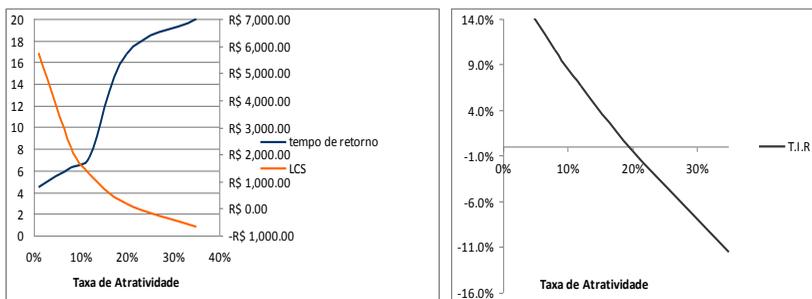
**Tabela 4.8** Cenário Econômico para os consumidores das cidades simuladas

Cenário para os consumidores	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Tempo de Retorno (Anos)	7,0	6,3	5,0	4,0	3,7
Taxa Interna de Retorno (%)	10,5	10,6	14,5	18,8	20,2
LCS (R\$)	2.568,8	2.256,7	3.035,3	3.909,9	4.202,9

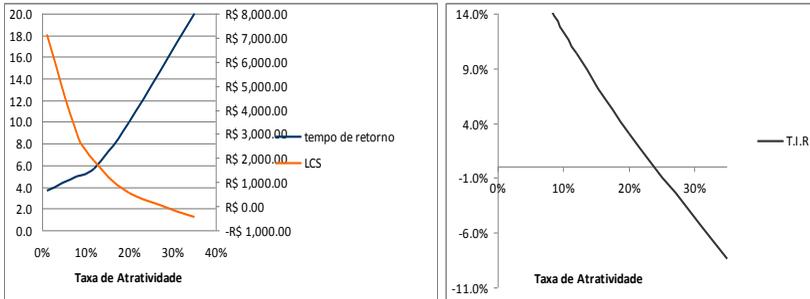
Assim como em todos os cenários, neste também foi utilizada uma taxa de desconto de 8% a.a e há uma sensibilidade dos parâmetros em função da taxa de atratividade, a qual é apresentada nas figuras seguintes.



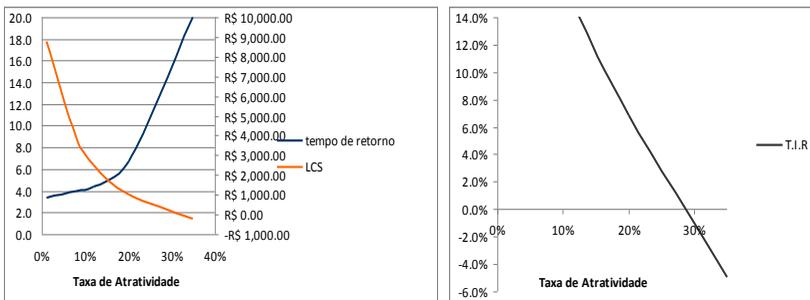
**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Norte



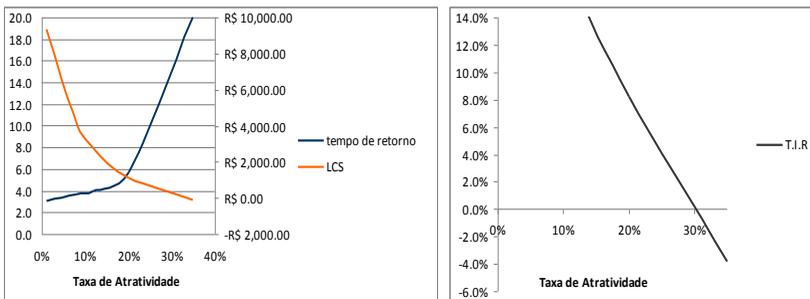
**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Nordeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Centro-Oeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Sudeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Sul

Por outro lado, na análise sob a perspectiva da concessionária de energia elétrica, observa-se que, mais uma vez esta só apresenta ganhos referentes a energia conservada anualmente e evitada no horário de pico, uma vez que não foi feito nenhum tipo de investimento financeiro por sua parte neste cenário. Sendo assim, o custo pago pela concessionária para evitar o pico é zero. Considerando-se o custo marginal de expansão

da ordem de R\$ 2.000 por cada kW instalado, adotado neste trabalho, e a supressão total da potência no horário de ponta para cada região do Brasil, estima-se então uma nova economia obtida pela concessionária de energia elétrica por cada residência que utilize um sistema de aquecimento solar com dois reservatórios e acionamento restrito a madrugada. Tal resultado é apresentado na tabela 4.9.

**Tabela 4.9** Cenário Econômico para as concessionárias de energia elétrica

Cenário para o Setor Elétrico	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Ganho por SASAD instalado (R\$)	488,51	496,39	590,94	709,12	835,19

Analogamente a como foi proposto no primeiro cenário, essa nova economia poderia ser repassada ao consumidor no sentido de subsidiar parte do seu investimento inicial com o sistema, facilitando assim a sua viabilidade e difusão.

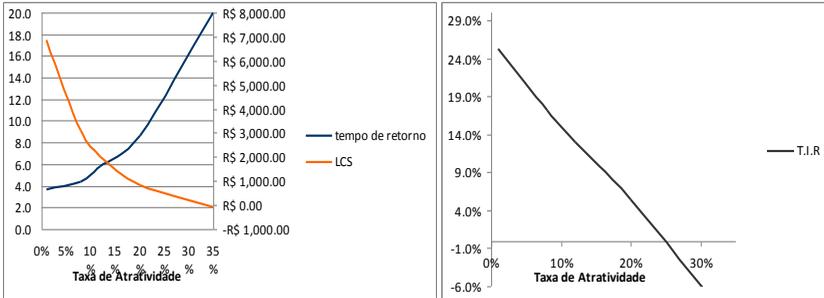
#### **4.4.6 Cenário 06: Acionamento da Energia Auxiliar restrito a Madrugada, Tarifa diferenciada pelo horário de consumo e Com subsídio do equipamento solar**

O sexto e último cenário é praticamente igual ao cenário anterior. Porém, assume-se aqui que o valor economizado pela concessionária energia com a supressão do pico de demanda seja repassado ao consumidor como forma de subsídio a compra do sistema solar. Desta forma, subtraindo o valor fornecido pela concessionária do investimento inicial total do equipamento solar (aquisição e instalação) um novo cenário econômico é estabelecido e apresentado na tabela 4.10.

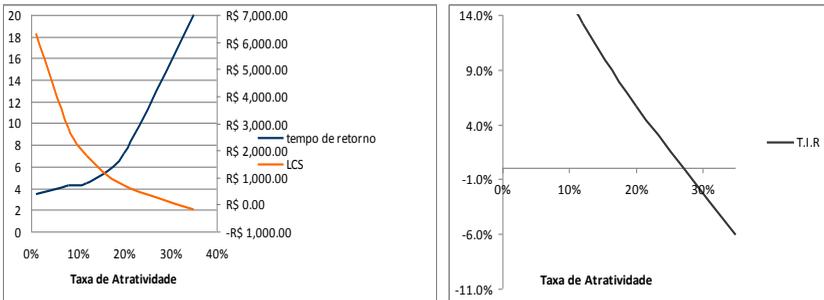
**Tabela 4.10** Cenário Econômico para os consumidores das cidades simuladas

Cenário para os consumidores	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
Tempo de Retorno (Anos)	4,3	4,3	3,0	2,3	2,0
Taxa Interna de Retorno (%)	17,1	17,4	24,5	33,9	40,9
LCS (R\$)	3.105,25	2.801,82	3.684,23	4.688,6	5.120,1

Por sua vez, a sensibilidade dos parâmetros em função da taxa de atratividade é apresentada nas figuras seguintes.



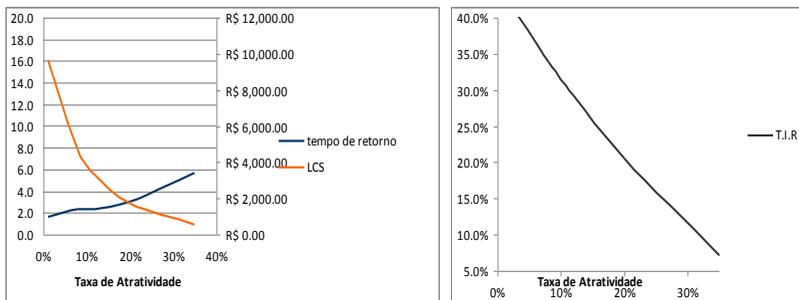
**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Norte



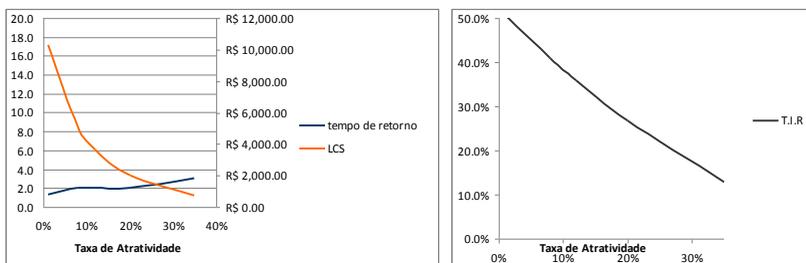
**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Nordeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Centro-Oeste



**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Sudeste

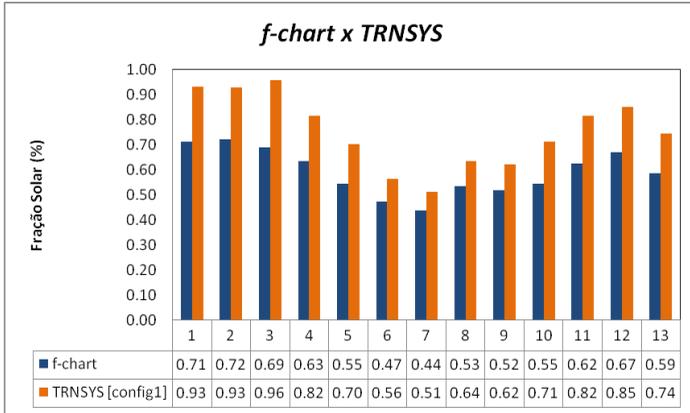


**Figura 4.** Análise de Sensibilidade para região Sul

Como o investimento feito pela concessionária no sentido de evitar o pico de demanda no horário de ponta é a mesma quantia fornecida ao consumidor como forma de subsídio do investimento inicial necessário para introdução do sistema de aquecimento solar, o custo para evitar o pico pago pela concessionária é o mesmo custo gasto com expansão.

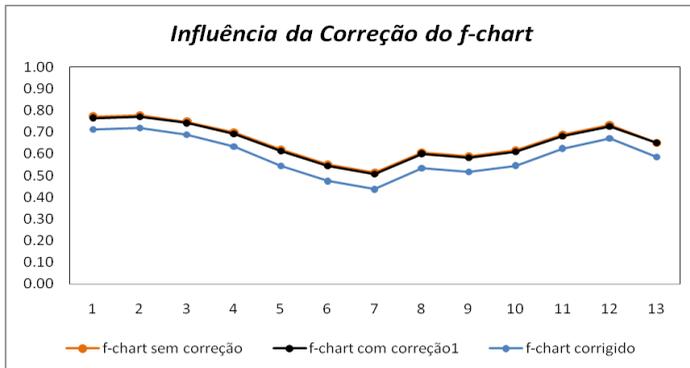
#### 4.5 MAPEAMENTO DO DESEMPENHO TÉRMICO DO SASAD

Como mencionado no terceiro capítulo, o mapeamento do desempenho térmico do sistema solar é realizado utilizando a ferramenta de projeto *f-chart*. Neste sentido, primeiramente os resultados obtidos pelas simulações no *TRNSYS* são comparados aos resultados que se obtêm com o *f-chart*, a fim de que seja estabelecida uma referência de erro percentual entre os dois valores. O resultado desta comparação é apresentado na figura 4.10.



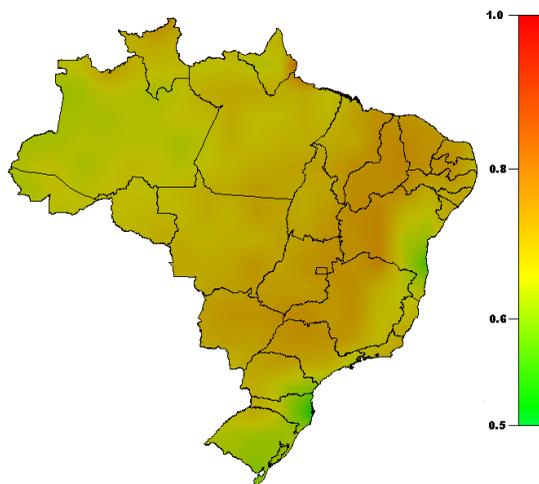
**Figura 4.10** Comparação entre a fração solar obtida pelo trnsys e pelo f-chart

Neste contexto, é interessante ressaltar também o efeito que as duas correções sugeridas pelo método apresentam sobre a fração solar, o qual pode ser observado na figura 4.11.



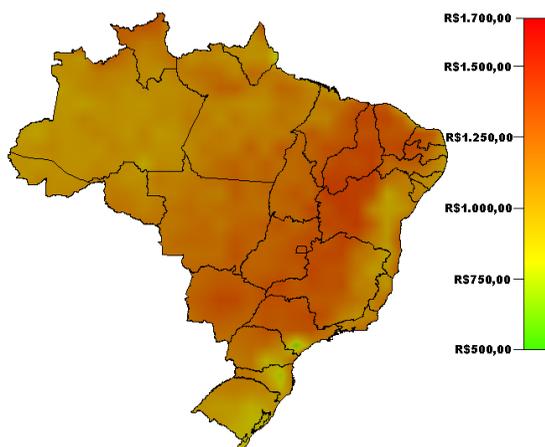
**Figura 4.11** Influência das correções no valor obtido da fração solar

Por conseguinte, a ferramenta é então utilizada, com suas devidas correções, para estimar a fração solar em todo território brasileiro. O resultado é apresentado na figura 4.12.



**Figura 4.12** Mapeamento da  $f$  obtida pelo  $f$ -chart em todo território brasileiro

As estimativas obtidas de fração solar foram posteriormente utilizadas para um levantamento econômico, sob o critério do LCS, a fim de, simplificada, estabelecer o mapeamento do impacto econômico para os consumidores. O resultado é apresentado na fig 4.13.



**Figura 4.4** Mapeamento do LCS em todo território brasileiro

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados das simulações apresentados mostraram os principais aspectos técnicos e econômicos associados à introdução dos sistemas de aquecimento solar de água nos domicílios de diversas regiões brasileiras, bem como seu impacto quando utilizado como substituto ao chuveiro elétrico.

Para determinação de sua viabilidade técnica foi utilizado como critério o conceito de fração solar, o qual estima quanto do consumo final de energia para aquecimento de água pode ser provido pela energia solar. Sob este critério, para efeitos de comparação, três configurações distintas foram simuladas no TRNSYS. Como resultado observou-se que o sistema de aquecimento solar composto pelo equipamento solar e um aquecedor de passagem como fonte de energia auxiliar é predominantemente melhor em todas as cidades simuladas, com exceção de Curitiba-PR onde o sistema composto pelo equipamento solar e uma resistência elétrica no interior do reservatório, em modo de acumulação, apresentou discretos 2,0% de superioridade. Embora nem sempre o melhor sistema para uma determinada região seja aquele que apresente a maior fração solar, neste caso, por apresentar valores predominantemente superiores, praticamente o mesmo preço de aquisição e ainda relativa facilidade de manutenção, conclui-se de imediato, sem a necessidade de efetuar uma comparação econômica, que o sistema onde a energia auxiliar é provinda de um aquecedor de passagem é a configuração mais adequada para o Brasil.

Neste sentido, ao considerar os valores de fração solar desta referida opção de configuração, observa-se que o menor valor obtido refere-se a cidade de Curitiba-PR. Nesta, obteve-se uma média anual de 58,0%, a qual é um pouco inferior ao valor de 70,0 %, considerado por muitos autores como a média desejada para fins residenciais. A justificativa para este valor um pouco abaixo do usual deve estar nas condições ambientais apresentadas pela cidade, a qual é considerada a capital mais fria do país, com as menores médias de temperatura ambiente, aumentando assim o fluxo de perdas térmicas. Com localizações semelhantes, as capitais vizinhas como São Paulo e Florianópolis, e a cidade de Santa Maria, no interior do Rio Grande do Sul, apresentaram um valor médio anual de 71,0%, 74,0% e 68,0%, respectivamente. Considerando estes quatro valores, isto significaria uma média anual de aproximadamente 68,0% para região mais fria do país, que é um valor adequado tecnicamente.

Nas cidades do Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília, que possuem temperaturas médias intermediárias em nível de Brasil, ou seja, não representa a região mais quente, mas também não representa a mais fria, a fração solar anual ficou em torno de 90,0%. Por sua vez, para o restante das cidades, situadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, que é a região mais quente do país, a fração solar foi superior a 93,0%, demonstrando o grande potencial local para o aproveitamento da energia solar. Assim como para os valores mais baixos, nos casos de valores mais elevados a justificativa também está no fator ambiental. Além da radiação solar privilegiada, as temperaturas ambientes elevadas da região fazem com as perdas térmicas sejam mínimas e que a temperatura da água de abastecimento da rede já chegue às residências com uma temperatura em torno de 30°C, dispensando muitas vezes a necessidade do aquecimento de água para o banho.

Já na avaliação do impacto no pico de demanda predominante no consumo diário, observou-se nas médias anuais da fração solar horária que, como esperado, o sistema de aquecimento solar de fato contribuiu significativamente para a sua redução, promovendo uma supressão que vai desde 85,0% na região sul do país até cerca de 95,0% na região Norte e Nordeste. Tal circunstância é favorecida pelo período de início do horário de ponta, no final da tarde, de modo que é aproveitado todo o período da manhã e da tarde para acumulação de energia no sistema e perdas térmicas minimizadas em função das maiores médias de temperaturas ambiente. O consumo de energia elétrica auxiliar ocorre praticamente no período da manhã, provavelmente para compensar as perdas térmicas durante a madrugada.

Na configuração do sistema simulada no algoritmo simplificado observa-se que houve uma redução de cerca de 10,0% nas médias anuais de fração solar para cada cidade, quando comparado a configuração discutida anteriormente, que foi simulada no TRNSYS. Este efeito já era esperado em decorrência do modo como é realizado o aquecimento auxiliar. O fato de este ser acionado apenas durante o período da madrugada torna necessário que seja adicionada ao sistema uma quantidade maior de energia para que, além de suprir a demanda de consumo, sejam também compensadas as perdas térmicas para o ambiente durante o dia. Em contrapartida, no que se refere ao impacto no pico de demanda, esta configuração possibilita a supressão total, aumentando assim o interesse por parte da concessionária de energia elétrica e, conseqüentemente, a possibilidade de haver um subsídio.

Observando os valores obtidos em cada uma das cidades simuladas, não restam dúvidas de que o sistema de aquecimento solar

adotado no presente trabalho é tecnicamente adequado para praticamente todas as regiões do Brasil, proporcionando uma grande capacidade de economia de energia e redução no pico de demanda. Mesmo nas cidades mais frias, como Curitiba e alguns interiores do sul do país, o valor obtido pode ser considerado satisfatório. Além disso, vale ressaltar ainda que o sistema de aquecimento solar adotado se trata de um modelo de baixo custo, que apresenta desempenho térmico relativamente mais baixo que outros disponíveis no mercado. Dessa forma, uma opção para aumentar o desempenho dos sistemas nos casos de cidades com climas mais particulares seria a troca dos componentes do sistema por outros mais eficientes.

Visto que o sistema de aquecimento solar de água é viável tecnicamente para o Brasil, o próximo passo no sentido de viabilizar a sua introdução nas residências seria avaliar a sua viabilidade econômica, a fim de estabelecer os impactos de economia de energia nas residências, para o consumidor, e a economia com custos marginais de expansão necessários para atender o pico de demanda, para a concessionária. Neste contexto, os impactos foram estimados, ancorado em seis supostos cenários de tarifação da energia elétrica e subsídio dos equipamentos solares.

Para consumidor, foi estimado o tempo de retorno que este levaria para recuperar o investimento assumido na introdução do SASAD, a taxa interna de retorno praticada pelo investimento (T.I.R) e a economia proporcionada pelo sistema, durante sua vida útil de operação, em comparação a um chuveiro elétrico convencional (LCS). Sob estes conceitos, o cenário para a introdução do SASAD é considerável viável economicamente para o consumidor quando apresentar um LCS positivo associado a um tempo de retorno plausível. Para auxiliar na análise é ainda considerada a taxa interna de retorno, determinando assim se o investimento está gerando mais economias ou custos. Nesta ótica, o investimento é considerado viável quando a T.I.R for maior que a taxa mínima de atratividade proposta.

Por outro lado, para a concessionária de energia elétrica estimou-se quanto seria economizado por cada residência que resolva substituir o chuveiro elétrico pelo SASAD. O cenário é considerável viável economicamente para a concessionária quando os custos despendidos com investimentos no sentido de reduzir o pico de demanda forem menores que os custos relativos a expansão da rede de fornecimento para suprir o pico de demanda. Neste contexto, assumem-se como custos no sentido de reduzir o pico de demanda qualquer subsídio que seja

concedido ao consumidor como contribuição para facilitar a aquisição do sistema de aquecimento solar.

Sob os critérios de análise expostos nos dois parágrafos anteriores, a introdução do sistema de aquecimento solar de água foi considerada viável para o consumidor residencial de cada região do Brasil em todos os cenários supostos, confirmando a hipótese de que, em longo prazo, é mais interessante economicamente investir no sistema de aquecimento solar do que continuar a pagar o consumo de eletricidade requerido pelo chuveiro elétrico.

No primeiro cenário, que se trata do atual cenário de práticas tarifárias e carência de subsídios dos equipamentos solares, apesar da viabilidade econômica indicada pelo LCS e T.I.R, observou-se um tempo de retorno que vai de 5 a 7 anos, da região sul a norte do país, respectivamente. Este valor de tempo de retorno pode ser considerado relativamente alto para alguns consumidores visto que a maioria deles almeja um retorno imediato. Todavia, neste mesmo cenário, há uma economia imediata para o setor elétrico que varia em torno de R\$ 500,00 a R\$ 700,00, por cada residência que substitua o chuveiro elétrico por um sistema de aquecimento solar. Desta forma, tal cenário também é perfeitamente viável para a concessionária, uma vez que esta só presencia ganhos. Diante disto, sugere-se então que a concessionária, como incentivo, subsidie parte do investimento inicial requerido para introdução do sistema de aquecimento solar, tornando o tempo de retorno do investimento mais atrativo para o consumidor, e aumentando assim a probabilidade deste resolver instalar o sistema em sua residência.

A influência econômica do subsídio da concessionária de energia elétrica é então quantificada no segundo cenário. Percebe-se que, se a concessionária repassar todo o valor economizado para o consumidor, de imediato há uma redução no tempo de retorno para 2 a 4 anos, da região sul a norte do país. Tal fato com certeza teria um impacto significativo na quantidade de consumidores que resolveriam adotar o referido sistema. Por outro lado, neste cenário, para a concessionária de energia elétrica, o custo para evitar o pico a princípio seria o mesmo que aquele gasto com expansão para sustentá-lo. Porém, uma vez que houve a redução significativa no pico de demanda do chuveiro, certamente haverá uma redução nos custos marginais de expansão. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL indicam que o chuveiro elétrico responde por de 46% do pico de demanda. Considerando o pior dos casos de redução, que corresponde a 85%, haveria uma redução de 34% no pico total caso se estabeleça uma predominância de substituição

dos chuveiros elétricos pelos sistemas solares. Supondo que os custos marginais de expansão sejam reduzidos na mesma proporção, haveria uma economia em longo prazo de R\$ 680,00 nos custos com expansão, por cada novo kW instalado. Sendo assim o novo custo marginal de expansão seria 1.320,00 R\$/kW e neste contexto, o cenário poderia também ser considerado viável para a concessionária de energia elétrica.

Por sua vez, o terceiro cenário mostra que, mesmo se não houver um subsídio dos equipamentos solares, a mudança na prática tarifária para uma modalidade em função do horário de consumo já significaria um benefício para o consumidor, reduzindo o tempo de retorno em 40,0% em relação ao cenário um, para 3 a 5 anos, do sul ao norte do país respectivamente. Para a concessionária os benefícios seriam os mesmos do primeiro cenário.

No quarto cenário além da prática tarifária diferenciada aborda-se ainda o subsídio da concessionária neste contexto. Este representa a melhor opção para o consumidor, reduzindo o tempo de retorno do investimento para 1 a 3 anos, do sul ao norte do país, respectivamente. Certamente este cenário possibilitaria uma grande revolução no atual cenário de posse de equipamentos para aquecimento de água e, sobretudo, no pico de demanda da curva de consumo. Os ganhos da concessionária seriam os mesmos que aqueles do segundo cenário.

O quinto cenário retrata a suposição da utilização de uma nova configuração de sistema de aquecimento solar, fundamentado no modo de acionamento da energia auxiliar restrito ao período da madrugada. Tal configuração só seria válida em uma modalidade de prática tarifária diferenciada. Todavia, observa-se que neste contexto, sem o subsídio do equipamento é mais interessante para o consumidor utilizar a configuração anteriormente proposta, conforme foi observado no terceiro cenário. Isto ocorre porque mesmo a redução da tarifa na madrugada não compensaria o aumento no preço de aquisição do equipamento em decorrência do segundo reservatório. Por outro lado, este seria o melhor cenário para a concessionária de energia elétrica, uma vez que esta não estaria realizando nenhum investimento com subsídios e ainda assim obteria de imediato uma economia de até R\$ 850,00 por cada chuveiro substituído, decorrente das economias com custos marginais de expansão.

O sexto e último cenário avalia então a melhora na economia para o consumidor se a concessionária de energia elétrica investisse os seus ganhos no subsídio do equipamento solar operando na configuração com acionamento pela madrugada. Há uma melhora no tempo de retorno, estabelecendo-se como o segundo melhor cenário para o consumidor.

Todavia, neste contexto de subsídio e tarifa diferenciada, ainda é mais vantajoso para o consumidor optar pela configuração anterior, conforme o quarto cenário. A análise dos ganhos para a concessionária de energia elétrica segue o mesmo procedimento lógico dos casos de subsídio anteriores, onde paga-se de imediato o mesmo custo que o de expansão, porém investe-se em um ganho maior em longo prazo. Neste cenário, visto que a supressão do pico dos chuveiros é total, a redução no pico de consumo seria de 40%, o que daria uma possível economia de R\$ 800,00 por kW instalado então redução dos custos marginais para 1200,00 R\$/kW. Visto que existe essa suposta economia em longo prazo, a concessionária poderia ainda aumentar o valor do subsídio de modo a incentivar o consumidor a optar pela configuração referida.

Todos os resultados foram estimados baseados numa taxa de atratividade de 8% ao ano, observou-se nos gráficos de sensibilidade que há uma influência significativa da variação dos parâmetros em função da taxa de atratividade em vigor. Entretanto estimasse que 8,0% seja um valor mais próximo do real para o consumidor. Alguns autores ainda sugerem uma taxa de 35%, o que se mostrou bastante incoerente, inviabilizando o investimento em todos os cenários.

No caso do mapeamento da fração solar utilizando o *f-chart*, observou-se que este subestima a fração solar, apresentando uma diferença de cerca de 15,0% nos valores obtidos pelo TRNSYS. Esta discrepância deve-se principalmente a consideração de médias mensais de temperatura ambiente e radiação solar, ao invés de horária. Além disso, utiliza-se também uma carga de consumo média única para cada região, o que de fato, afeta o resultado. No entanto, por se tratar de uma ferramenta de projeto, este resultado já era esperado, e acredita-se que esta discrepância não é um fator determinante quando a intenção é reduzir a demanda elétrica dos chuveiros. O mapeamento dos impactos econômicos para o consumidor através do LCS apresenta uma diferença daqueles apresentados pelo TRNSYS em função da fração solar utilizada e de um valor único de tarifa praticada para todas as regiões. Apesar das simplificações dos métodos observam-se resultados coerentes e satisfatórios sob a perspectiva de viabilidade dos SASAD no Brasil.

Como proposta de trabalhos futuros pretende-se desenvolver um modelo de simulação detalhado do sistema configurado com dois reservatórios, através da atribuição de um novo componente no TRNSYS e validar este modelo a fim de aumentar sua confiabilidade. E ainda associar a este um modelo de previsão meteorológica inteligente, baseado no conceito de redes neurais, de modo que forneça os dados

necessários para a sincronia do acionamento da energia auxiliar na madrugada. Desta forma, espera-se que além da configuração proposta de energia auxiliar por aquecimento de passagem tenha-se também o sistema de dois reservatórios como opção de supressão total no pico de demanda o que aumentaria a probabilidade de ocorrer um subsídio por parte da concessionária.