

MAGNO LUIZ VIDOTTO

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO E
TOMADA DE DECISÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR
DE ÁGUA**

CASCABEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2014

MAGNO LUIZ VIDOTTO

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO E
TOMADA DE DECISÃO DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR
DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO – 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

V698a Vidotto, Magno Luiz
Aplicativo computacional para dimensionamento e tomada de
decisão de sistemas de aquecimento solar de água / Magno Luiz Vidotto
— Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.
57 p.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do
Paraná.

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na
Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

1. Energia solar. 2. Aquecimento de água. 3. Análise econômica.
I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 621.47

MAGNO LUIZ VIDOTTO

**“Aplicativo computacional para dimensionamento e tomada de decisão
de sistemas de aquecimento solar de água”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Felix Abrão Neto
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/Campo Grande

Cascavel, 20 de fevereiro de 2014.

*Dedico este trabalho a todos os profissionais
engajados no desenvolvimento e na difusão da
tecnologia solar térmica.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao Professor Carlos Eduardo Camargo Nogueira, pela orientação, apoio e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Jair Antonio Cruz Siqueira e Ricardo Lessa Azevedo, pela amizade e sábias contribuições.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

Aos demais professores, funcionários e colegas de turma do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pelo apoio e incentivo, especialmente aos colegas Darlisson Bentes dos Santos, Gilson Debastiani e Lana Ferreira Calza.

Finalmente, agradeço a minha mãe, Vera Lucia de Castilho, pela dedicação, paciência, compreensão, incentivo e amor.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	VIII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 O Sol	3
2.2 Radiação solar	4
2.3 Sistema de aquecimento solar de água	7
2.3.1 Coletores solares	9
2.3.2 Reservatório térmico (boiler)	12
2.3.3 Tubulações isoladas termicamente	13
2.3.4 Bomba hidráulica	13
2.3.5 Fonte auxiliar de energia	13
2.4 Programas computacionais para dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Cálculo da demanda diária de água quente	18
3.2 Cálculo da demanda mensal de energia	19
3.3 Dimensionamento dos aquecedores de passagem elétricos	19
3.4 Dimensionamento dos aquecedores de passagem a gás	20
3.5 Dimensionamento dos aquecedores de acumulação elétricos	21
3.6 Dimensionamento dos aquecedores de acumulação a gás	21
3.7 Cálculo da área coletora e do volume do reservatório térmico	22
3.7.1 Metodologia da Carta F	22
3.7.2 Metodologia da NBR 15569	27
3.8 Dimensionamento do sistema auxiliar de aquecimento	28
3.9 Determinação do tipo de circulação e da pressão de operação do sistema	28
3.10 Análise econômica	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32

4.1 Aplicativo Solardim	32
4.2 Exemplos de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água..	40
4.2.1 Resultados do dimensionamento	41
4.2.2 Balanço energético	42
4.2.3 Viabilidade econômica	43
6. CONCLUSÕES	45
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APÊNDICES	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do Sol.....	3
Figura 2: Espectro da radiação solar.....	5
Figura 3: Instrumentos para medição da radiação solar.	6
Figura 4: Esquema de um sistema passivo direto.....	8
Figura 5: Esquema de um sistema ativo direto.	8
Figura 6: Corte de um coletor solar plano.	9
Figura 7: Extração de calor utilizando heat-pipe.	10
Figura 8: Extração de calor do tipo tubo em U.	11
Figura 9: Extração de calor por transferência direta (water-in-glass).	11
Figura 10: Detalhes internos e externos de um reservatório térmico.	12
Figura 11: Bomba hidráulica.....	13
Figura 12: Sistema solar com aquecedores de passagem a gás.....	14
Figura 13: Sistema de aquecimento conjugado.	15
Figura 14: Distâncias recomendadas para um sistema em termossifão.	29
Figura 15: Diagrama de blocos do aplicativo desenvolvido.....	32
Figura 16: Tela inicial do Solardim.	33
Figura 17: Elementos Locais.	34
Figura 18: Geometria do sistema.	35
Figura 19: Sistema solar.	36
Figura 20: Reservatório térmico.	37
Figura 21: Aquecedor auxiliar.....	37
Figura 22: Consumo de água quente da edificação.....	38
Figura 23: Resultados do dimensionamento.	38
Figura 24: Análise Econômica.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vazão nos pontos de utilização em função do aparelho sanitário	18
Tabela 2: Dia médio do mês.....	25
Tabela 3: Configurações dos sistemas solares	40
Tabela 4: Dados de entrada comuns aos sistemas.....	40
Tabela 5: Parâmetros econômicos	41
Tabela 6: Resultados do dimensionamento	41
Tabela 7: Balanço energético dos sistemas dimensionados	43
Tabela 8: Análise econômica para os sistemas dimensionados segundo a metodologia da NBR 15569	44
Tabela 9: Análise econômica para os sistemas dimensionados segundo a metodologia da Carta-F.....	44

RESUMO

VIDOTTO, Magno Luiz, Me., Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro de 2014; **Aplicativo computacional para dimensionamento e tomada de decisão de sistemas de aquecimento solar de água**. Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

O presente trabalho teve como objetivo a elaboração de um aplicativo computacional para realizar o dimensionamento de sistemas solares de aquecimento de água de pequeno porte. O aplicativo foi desenvolvido usando a plataforma MATLAB e seu algoritmo foi estruturado de modo a minimizar a intervenção do usuário. No desenvolvimento do aplicativo foram utilizadas metodologias consolidadas e relações práticas buscando a otimização técnica e econômica da instalação. Como metodologias de projeto foram utilizadas a Carta-F e a NBR 15569, acrescidas de análise econômica. O banco de dados foi construído utilizando dados de desempenho de equipamentos comerciais provenientes do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e dados meteorológicos fornecidos pelo Atlas Solarimétrico Brasileiro e pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR). O aplicativo desenvolvido possibilita o dimensionamento de sistemas de circulação natural e de circulação forçada, constituídos por coletores planos ou coletores a vácuo do tipo U, reservatório térmico horizontal e fonte de energia auxiliar (elétrica ou a gás). Também permite que o usuário modifique, a qualquer instante, os parâmetros de entrada, possibilitando simular diferentes situações de utilização e encontrar a melhor solução técnica/econômica sem recorrer ao uso de métodos demorados. Além disso, sua utilização se mostra bastante simples, exigindo do utilizador não mais do que o conhecimento básico em energia solar.

Palavras-chave: Energia solar; Aquecimento de água; Análise econômica.

ABSTRACT

VIDOTTO, Magno Luiz. Me., Universidade Estadual do Oeste do Paraná, in February, 2014; **Software for sizing and decision-making of solar water heating systems**. Adviser: Carlos Eduardo Camargo Nogueira, Dr.

The present work proposes the development of a software for sizing small solar water heating systems. The application was developed using the MATLAB platform and its algorithm was structured to minimize the user intervention. The software was developed using consolidated methodologies and practices relationships, aiming at the technical and economical project optimization. The used project methodologies were the F-Chart and NBR-15569, together with an economic analysis. The database was build using commercial equipment performance data from the official tests of the Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) and meteorological data from the Atlas Solarimétrico Brasileiro and Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR). The developed software allows the sizing of natural and forced circulation systems, composed of flat plate collectors or evacuated collectors type U, horizontal thermal storage tank and auxiliary power supply (electric or gas). It also allows the user to modify the input parameters at any time, making possible to simulate different situations and find the best technical and economical solution without the use of time-consuming methods. Moreover, its use proves to be quite simple, requiring no more than the basic knowledge of solar energy.

Keywords: Solar energy; Water heating; Economic analysis.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda global por energia, a possibilidade de redução da oferta de combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de fontes de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental (VICHI; MANSOR, 2009). Muitas alternativas energéticas já estão disponíveis e vêm sendo aplicadas em diversos países: energia eólica, biomassa, PCHs (Pequenas Centrais Hidrelétricas), energia solar térmica e energia solar fotovoltaica. Dentre estas, a energia solar térmica para o aquecimento de água tem se destacado devido à sua importância social, tecnológica, econômica, ambiental e à abundância do recurso solar em todas as regiões do planeta (ABRAVA, 2008).

Tradicionalmente os sistemas de aquecimento solar de água são constituídos por coletores solares, reservatório térmico, fonte auxiliar de energia e tubulações para distribuição do fluido aquecido. Os coletores são responsáveis pela captação da radiação solar, conversão em energia térmica e aquecimento da água. O reservatório térmico tem por função armazenar a água aquecida pelos coletores solares durante o dia e disponibilizá-la nos horários de uso. Já o sistema auxiliar tem por objetivo complementar o aquecimento em períodos de baixa insolação ou em situações onde a demanda de água quente é maior que a capacidade de geração do aquecedor solar (LIMA, 2003). Dentre as várias possibilidades de aplicação desses sistemas, a mais comum é o aquecimento de água para banho em residências.

Atualmente o sistema elétrico é o mais utilizado no aquecimento de água para banho no Brasil. No setor residencial se tem 26% do consumo de eletricidade atribuído a este fim, o que representa 6% do consumo total de energia elétrica nacional. Além disso, esta utilização está altamente concentrada entre as 18 e 21h, o que ocasiona sérios problemas de geração e distribuição de energia neste intervalo (PRADO et al., 2007). Uma das alternativas para reduzir estes impactos seria a utilização, em maior escala, da energia solar para aquecimento de água, algo que é totalmente viável num país como o Brasil onde a média anual de radiação solar incidente varia entre 1200 e 2400 kWh/m²/ano, valores bem superiores aos dos países da União Europeia, onde se utiliza mais intensamente o recurso solar, como Alemanha (900-1250 kWh/m²/ano), França (900-1650 kWh/m²/ano) e Espanha (1200-1850 kWh/m²/ano) (PEREIRA et al., 2006).

Contudo, um dos obstáculos para a difusão dos sistemas de aquecimento solar em terras brasileiras tem sido o alto investimento inicial, em equipamentos e instalação, quando comparado aos sistemas convencionais. Outro ponto importante diz respeito à prática de dimensionamento adotada no país. A maioria dos fabricantes e vendedores de sistemas de aquecimento utilizam tabelas com recomendações de dimensionamento que indicam o número de placas recomendadas em função do número de usuários e do número de pontos de consumo de água quente da edificação. Tal procedimento pode até produzir bons resultados para projetos familiares típicos, mas quando se trata de um dimensionamento diferente, atendendo a uma demanda particular, ou havendo uma instalação em um clima distinto, eles falham e comprometem a confiabilidade na tecnologia solar (BORGES, 2000; SOUZA, 2009).

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um aplicativo computacional para auxiliar no dimensionamento de sistemas solares de aquecimento de água de pequeno porte. Pretende-se com a elaboração dessa ferramenta tornar o dimensionamento desses sistemas menos empírico e mais próximo da realidade, levando em conta as particularidades de consumo de água quente da instalação, as características climáticas do local, os dados de desempenho dos equipamentos, a orientação dos coletores, as alternativas e o custo do sistema complementar.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Construir um banco de dados com os valores de radiação solar e de temperatura do ar para os principais municípios do Paraná;
- Construir um banco de dados com as especificações técnicas e os custos dos componentes de um sistema de aquecimento solar de água;
- Corrigir a radiação solar em função do posicionamento do coletor solar;
- Calcular a fração solar para uma determinada localidade em função da configuração do sistema;
- Calcular a área de coletores solares em função do tipo e do modelo de coletor previamente selecionado;
- Calcular o volume do reservatório térmico para suprir a demanda diária de água quente da edificação;
- Dimensionar o sistema de aquecimento auxiliar;
- Realizar a análise econômica dos sistemas dimensionados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Sol

O Sol, além de fonte de vida, é a origem de praticamente todas as formas de energia que o homem vem utilizando ao longo de sua história e pode ser a resposta para a questão do abastecimento energético no futuro. Em apenas uma hora esse astro despeja sobre a Terra um montante de energia superior ao consumo global de um ano inteiro (SILVA, 2006). Brilhando a pelo menos 5 bilhões de anos, estima-se que ele continuará emanando energia por outros 6 bilhões de anos (FERNANDES; GUARONGHI, 2007).

O Sol é responsável por aproximadamente 99,86% da massa do sistema solar e é constituído basicamente por hidrogênio (74% da massa ou 92% de seu volume) e hélio (24% da massa ou 7% do volume) (SILVA, 2006). Sua estrutura interna pode ser visualizada na Figura 1.

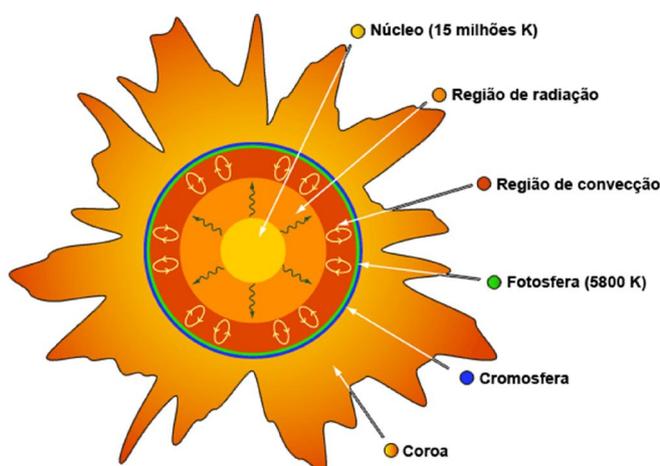


Figura 1: Estrutura do Sol.
Fonte: HKU – Universidade de Hong Kong¹.

A fotosfera, com cerca de 330 km de espessura e temperatura de 5800 K, é a camada visível do Sol. Logo abaixo da fotosfera se localiza a zona convectiva, que se estende por 104325 km (15% do raio solar). Abaixo dessa camada está a zona radiativa, por onde a energia flui por radiação (OLIVEIRA; SARAIVA, 2013).

¹Disponível em: <<http://www.physics.hku.hk/~nature/notes/lectures/chap11.html>>. Acesso em: abr. 2013.

O núcleo, com temperatura média de 15 milhões K, é a região na qual a energia solar é produzida por meio de reações nucleares. Nessas reações, 4 núcleos de hidrogênio são transformados em 1 núcleo de hélio e a diferença de massa entre esses dois elementos é convertida totalmente em energia. Estima-se que a cada segundo o Sol tem aproximadamente 4 milhões de toneladas de matéria transformadas em energia (ALVES, 2010). Devido aos obstáculos até a superfície, a luz produzida no núcleo do Sol leva cerca de 1 milhão de anos para deixá-lo. Uma vez na superfície, leva apenas 8 minutos e 20 segundos para chegar a Terra, percorrendo os 150 milhões de quilômetros que a separam do Sol.

A cromosfera é a camada da atmosfera solar logo acima da fotosfera. Essa camada tem cor avermelhada e é visível durante os eclipses solares. Estende-se por 10 mil km acima da fotosfera e sua temperatura cresce da base para o topo, tendo um valor médio de 15 mil K. Acima da cromosfera se encontra a coroa solar, que se estende por 2 raios solares e é visível durante os eclipses totais (OLIVEIRA; SARAIVA, 2013).

2.2 Radiação solar

A energia radiante emitida pelo Sol, sob a forma de ondas eletromagnéticas, é chamada de radiação solar. Em uma visão quântica, esta radiação é composta por um fluxo de fótons de energia.

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar. Sua composição espectral corresponde aproximadamente a de um corpo negro com temperatura de 5800 K. Cerca de 50% desta radiação situa-se na parte visível do espectro eletromagnético (400 a 700 nm) e a outra metade encontra-se, sobretudo, na zona do infravermelho próximo (700 a 1400 nm). Uma pequena parcela situa-se, ainda, na região ultravioleta do espectro (100 a 400 nm) (SILVA, 2006).

A Figura 2 mostra o espectro da radiação solar no topo da atmosfera terrestre e ao nível do mar. Também mostra o espectro da radiação de um corpo negro com a mesma temperatura. Nota-se que parte importante da energia solar que chega a Terra é transportada na faixa visível do espectro.

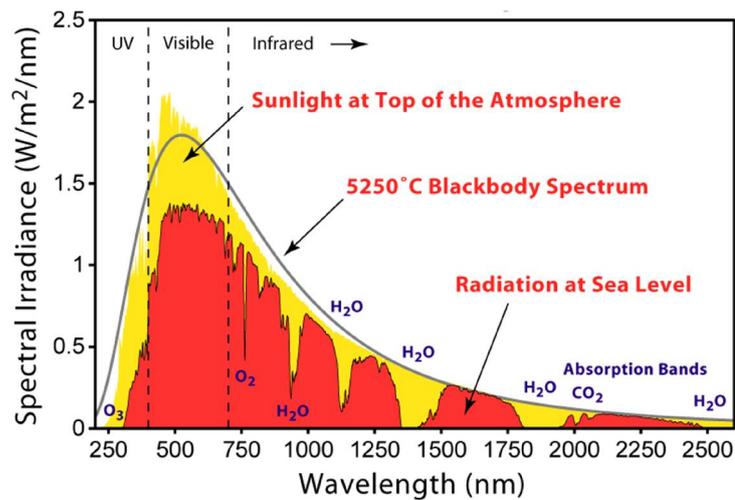


Figura 2: Espectro da radiação solar.
Fonte: PAGLIARO et al., 2008.

A quantidade de radiação solar recebida em certa altura e local do sistema Atmosfera-Terra depende basicamente de 4 fatores:

1 - Constante solar (1368 W/m^2): Refere-se à quantidade média de radiação recebida num ponto, perpendicular aos raios solares, localizado no exterior da atmosfera terrestre a meia distância do Sol. Varia ligeiramente dependendo da energia emitida pelo Sol e da distância Terra-Sol (CRESESB, 2006).

2 - Transparência da atmosfera: Tem papel importante na quantidade de radiação que atinge a superfície terrestre, dado que diferentes constituintes atmosféricos absorvem ou refletem energia de diversas formas e quantidades. Do total de radiação incidente na atmosfera terrestre, apenas 51% pode ser convertido em trabalho. Dos 49% restantes, 4% são refletidos de volta ao espaço pela superfície terrestre, 26% são espalhados ou refletidos para o espaço pelas nuvens e partículas atmosféricas e 19% são absorvidos pelos gases atmosféricos, partículas e nuvens (PIDWIRNY, 2006).

3 - Duração do dia: Quanto maior a duração do dia, maior será a possibilidade de insolação. Por sua vez, a duração do dia varia com a latitude e com as estações do ano.

4 - Ângulo de incidência dos raios solares: O ângulo dos raios solares que atingem a superfície terrestre varia consideravelmente com a latitude. Uma superfície perpendicular a um feixe vertical de raios solares receberá a quantidade máxima de radiação, enquanto que em locais onde os raios solares são oblíquos, a insolação será menor em razão dos raios solares serem forçados a atravessar uma camada mais espessa da atmosfera que reflete e absorve energia, espalhando-a.

A radiação solar que finalmente atinge a superfície terrestre é constituída pela radiação solar direta e pela radiação solar difusa. A radiação direta é a parcela que chega a superfície do solo diretamente. Já a radiação difusa é a parcela de energia proveniente das demais direções que, em dias de céu limpo, corresponde a 15% do total da radiação incidente. A soma dessas duas parcelas é denominada de radiação solar global (VIENELLO; ALVES, 1991).

Para medir a energia radiante que atinge a superfície terrestre são utilizados os aparelhos conhecidos como solarímetros, piranômetros ou radiômetros (Figura 3). O conhecimento dessa medida é de extrema importância na identificação e na quantificação da influência das condições atmosféricas e climáticas que podem interferir na eficiência das instalações de captação e conversão da energia solar em outras formas de energia (CRESESB, 2006).

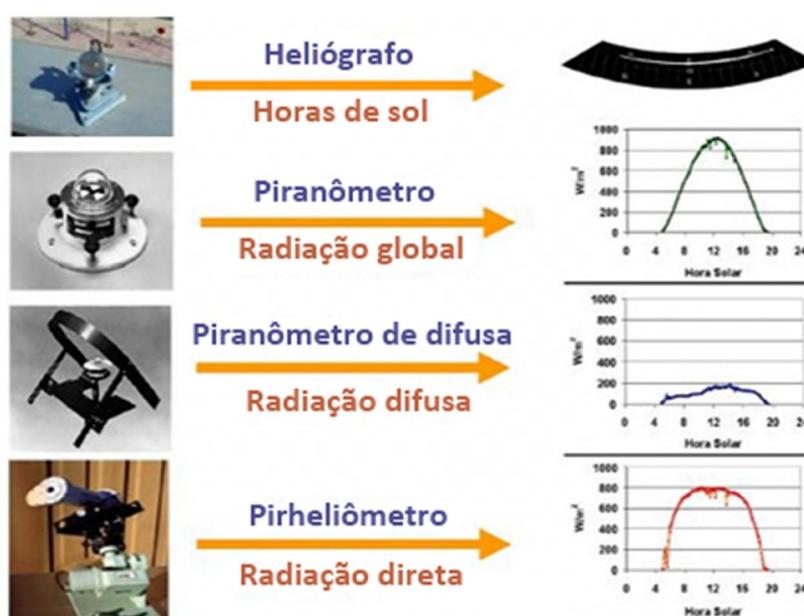


Figura 3: Instrumentos para medição da radiação solar.
Fonte: ABRAVA²

Por sua vez, a radiação solar pode ser utilizada como fonte de energia térmica para aquecimento de fluídos (conversão heliotérmica), ser convertida diretamente em energia elétrica (conversão fotovoltaica) ou ainda ser utilizada de forma passiva através da absorção ou penetração nas edificações, reduzindo a demanda de energia para aquecimento e iluminação.

²Disponível em: <<http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/curso2.pdf>>. Acesso em abr. 2013.

2.3 Sistema de aquecimento solar de água

A instalação mais simples para aproveitamento de energia solar é aquela destinada ao fornecimento de água quente para uso em sistemas de pequeno porte. Estas instalações são constituídas basicamente por coletores solares, reservatório de água quente, tubulações isoladas termicamente e por uma fonte auxiliar de energia. Em alguns casos, é incluída nesta configuração uma bomba de circulação que garante uma vazão fixa de água no coletor e um consequente controle sobre sua eficiência. Estes sistemas podem ser classificados, segundo o uso da bomba, em sistemas ativos ou sistemas passivos (COMETA, 2004; LISBOA, 2012).

No sistema passivo a água circula naturalmente devido ao gradiente de pressão provocado pela diferença de temperatura entre o reservatório térmico e os coletores. Em função da sua simplicidade e da baixa demanda por manutenção, este sistema é o mais utilizado no Brasil. As desvantagens dele é que o reservatório térmico deve obrigatoriamente estar acima do nível dos coletores e a distância percorrida pela água quente não deve ser muito grande, pois a perda de carga pode prejudicar a circulação (POZZEBON, 2009).

No sistema ativo a circulação de água é realizada por meio de uma bomba hidráulica. A bomba é controlada por sensores de temperatura instalados nas tubulações de entrada e de saída dos coletores. Quando a diferença de temperatura entre esses pontos atinge um valor preestabelecido a bomba é acionada. Seu desligamento ocorre quando a diferença de temperatura torna-se muito pequena ou quando a água do reservatório atinge um valor desejável. Nessa configuração, o reservatório pode ser instalado em qualquer posição em relação aos coletores solares. Contudo, por exigir mais dispositivos para o seu funcionamento o custo deste sistema tende a ser superior ao do sistema passivo (SOUZA, 2009).

Os sistemas solares de aquecimento de água podem ainda ser classificados em diretos e indiretos. Nos sistemas diretos o fluido armazenado no reservatório térmico é o mesmo que circula nos coletores solares. Já nos sistemas indiretos, os coletores aquecem um fluido refrigerante (óleo, etileno-glicol ou propileno-glicol) que transfere calor para a água por meio de um trocador de energia térmica. Estes últimos, por serem muito dispendiosos, são mais utilizados em regiões de clima muito severo para evitar que ocorra o congelamento da água (LIMA, 2003).

As Figuras 4 e 5 mostram a representação esquemática de sistemas passivos e ativos, respectivamente.

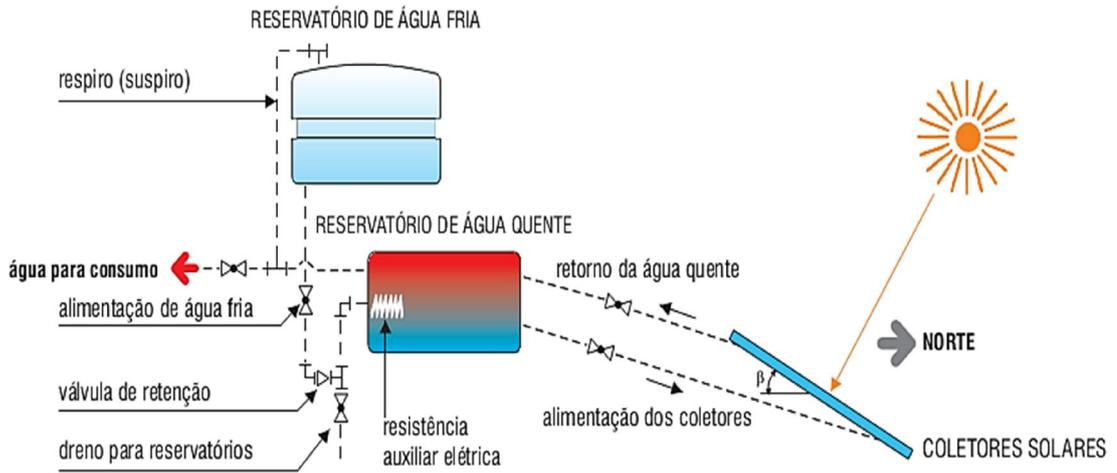


Figura 4: Esquema de um sistema passivo direto.
Fonte: Lima, 2003.

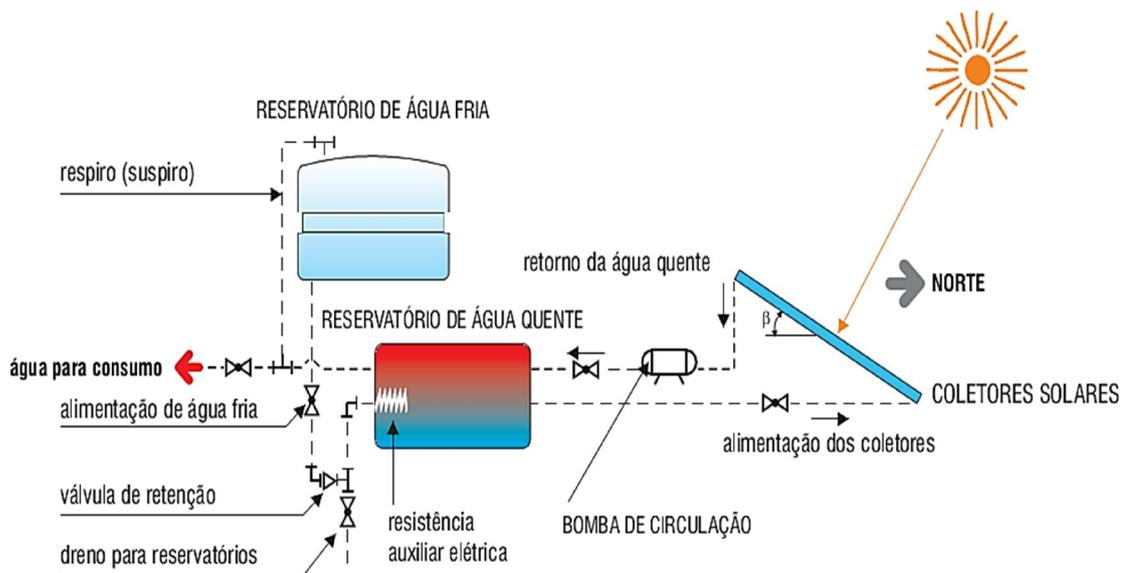


Figura 5: Esquema de um sistema ativo direto.
Fonte: Lima, 2003.

Nas seções a seguir, há uma breve descrição dos principais equipamentos que compõem um sistema de aquecimento solar de água.

2.3.1 Coletores solares

O coletor é o principal componente de um sistema de aquecimento solar. Ele é o responsável pela captação da radiação solar, pela conversão em energia térmica e pelo aquecimento do fluido de trabalho. Atualmente, os coletores mais empregados são: o coletor plano, mundialmente mais utilizado, e o coletor de tubos a vácuo, com mercado em ascensão devido ao excelente desempenho em regiões de clima frio (ROSA, 2012).

O coletor solar plano (Figura 6) é constituído por uma caixa retangular de alumínio, hermeticamente fechada e termicamente isolada por revestimentos de poliuretano expandido ou lã de vidro. No seu interior há uma serpentina de cobre por onde o fluido escoa. Em volta da serpentina existe uma placa absorvedora, também de cobre, pintada de preto fosco para facilitar a absorção de calor. Na parte superior há uma cobertura de vidro transparente que permite a entrada de radiação solar e evita que parte do calor da placa absorvedora se perca para o meio.

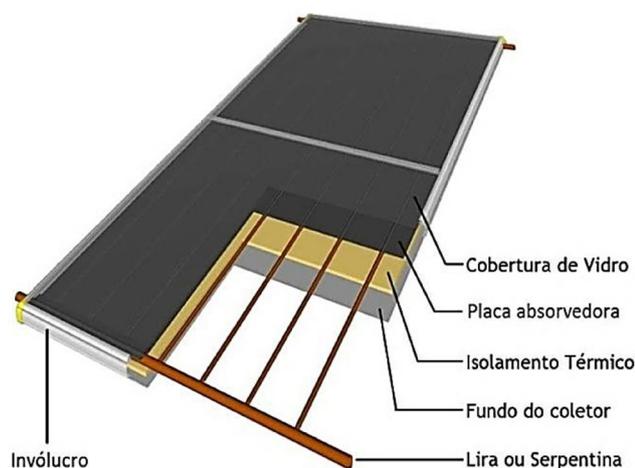


Figura 6: Corte de um coletor solar plano.
Fonte: Vida Solar³.

Os coletores planos podem atingir temperaturas de até 80°C e são muito utilizados no aquecimento de água em residências, edifícios, hospitais, hotéis e indústrias. Suas principais vantagens são: a simplicidade de construção, o custo relativamente baixo, a facilidade de reparo e a durabilidade (ABRAVA, 2008).

³Disponível em: <<http://vidasolar.saomanuel.com/wp-content/uploads/2012/05/Coletor-Solar-em-Corte.jpg>> Acesso em jun. 2013.

O coletor solar de tubos a vácuo é uma tecnologia relativamente nova e de melhor eficiência que a do coletor plano. Esses coletores permitem atingir temperaturas de trabalho acima de 80°C e, por isso, podem ser utilizados em aplicações que requerem um fornecimento de energia mais elevado. O tubo a vácuo mais comum é composto por dois tubos concêntricos de vidro com parede dupla. A parede interna é revestida por nitrato de alumínio, que possui excelente capacidade de absorção de calor. Entre o tubo interno e o externo está o isolamento a vácuo, que é o principal responsável por atenuar as perdas térmicas (MANEA et al. 2011).

Os coletores a vácuo podem utilizar diferentes formas de extração de calor. As mais comuns são: a utilização de tubos de calor (*heat-pipe*), tubos em U (*U-tube*) e a transferência direta (*water-in-glass*) (SHUKLA et al. 2013).

Na primeira forma de extração, um tubo de cobre denominado *heat-pipe* é inserido dentro do tubo a vácuo. O *heat-pipe* contém em seu interior um fluido facilmente evaporável (metanol, etanol ou acetona) que sofre um ciclo de evaporação/condensação. Ao absorver calor, o líquido evapora, deslocando-se para a parte mais elevada do coletor onde transfere calor para a água que circula no cabeçote. Mais frio, o fluido condensa e regressa por gravidade até a parte inferior do tubo de calor, reiniciando o ciclo. Devido à baixa capacidade térmica, este tipo de coletor oferece uma resposta rápida à incidência solar. Entretanto, seu custo mais elevado faz com que não seja muito utilizado (MANEA, 2012). A Figura 7 mostra o esquema de funcionamento de um coletor deste tipo.

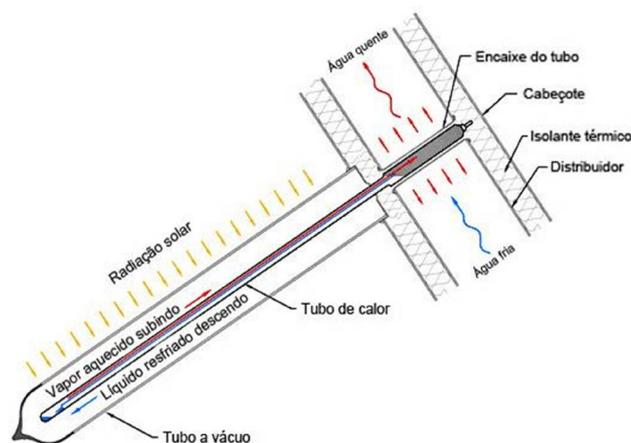


Figura 7: Extração de calor utilizando heat-pipe.
Fonte: Prosun India⁴.

⁴Disponível em: <<http://www.prosunindia.com/images/hwheat1.gif>> Acesso em jun. 2013.

Na extração do tipo U (Figura 8) um tubo de cobre em forma de 'U' é montado no interior do tubo a vácuo. A água fria entra por uma das extremidades do tubo, absorve calor, e sai quente pela outra. Atualmente, este tipo de extração é mais utilizado que o *heat-pipe* (LIANGDONG et al., 2010).

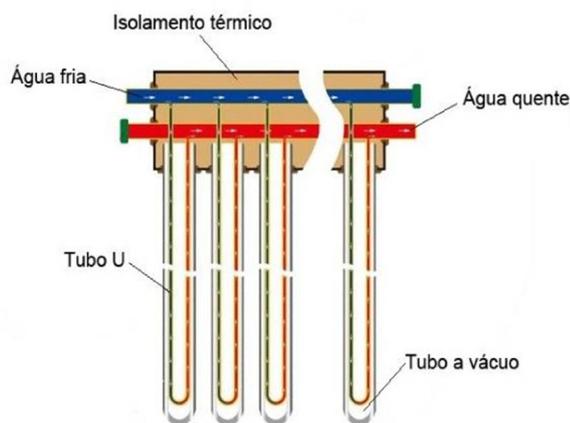


Figura 8: Extração de calor do tipo tubo em U.
Fonte: JanSun⁵.

Na extração por transferência direta (Figura 9), a água tem contato com o tubo de vidro interno do coletor. Com a incidência de radiação solar o tubo aquece a água que sobe ao reservatório localizado na parte superior. Este método de extração é o mais utilizado em função da simplicidade e do baixo custo de fabricação do coletor. Entretanto, se um dos tubos vier a ser danificado todo o sistema pode ser comprometido (BUDIHardJO e MORRISON, 2009).

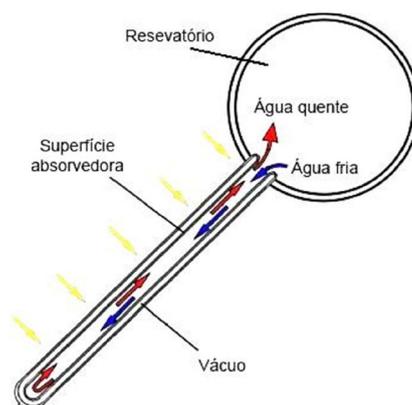


Figura 9: Extração de calor por transferência direta (water-in-glass).
Fonte: Adaptado de Budihardjo e Morrison, 2009.

⁵Disponível em: <http://img.diytrade.com/cdimg/1727744/24806602/0/1330312616/U_Pipe_Solar_Collector_Series.jpg> Acesso em jun. 2013.

2.3.2 Reservatório térmico (boiler)

O reservatório térmico (Figura 10) tem por função armazenar a água aquecida pelos coletores solares durante o dia e disponibilizá-la nos horários de uso. Sua capacidade de armazenamento costuma ser muito próxima da demanda de água quente da instalação. Ele é constituído por corpo externo em alumínio, isolante térmico (lã de vidro, lã de rocha ou poliuretano expandido), corpo interno (aço inox ou cobre) e tubulações. Quando necessário, pode apresentar em seu interior um sistema de aquecimento auxiliar (resistência elétrica e termostato) e de proteção contra corrosão (anodos de sacrifício) (ABRAVA, 2008).

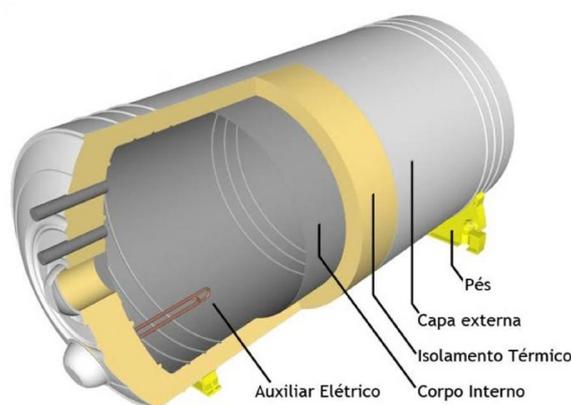


Figura 10: Detalhes internos e externos de um reservatório térmico.
Fonte: Vida Solar⁶.

Os reservatórios térmicos costumam ser classificados em função da pressão de trabalho e do posicionamento físico. Em relação à pressão de trabalho, podem ser do tipo fechado (pressurizado) ou aberto (não pressurizado). Os fechados trabalham com pressões acima da atmosférica e são normalmente pressurizados por uma caixa de água mais elevada. Já os abertos trabalham sempre em pressão atmosférica. Quanto ao posicionamento físico, os reservatórios podem ser do tipo horizontal ou vertical. Os primeiros são mais utilizados por questões de economia de espaço. Porém, os do tipo vertical propiciam uma melhor estratificação térmica ao reduzir a área de troca de calor entre as camadas de água, o que aumenta o desempenho do sistema (LAFAY, 2005).

⁶Disponível em: <<http://vidasolar.saomanuel.com/wp-content/uploads/2012/05/Reservatorio-Termico-Solar.jpg>> Acesso em jun. 2013.

2.3.3 Tubulações isoladas termicamente

De acordo com a ABRAVA (2008), as tubulações utilizadas em sistemas de aquecimento solar podem ser de cobre, aço galvanizado ou outro material que suporte as pressões e temperaturas de operação do sistema. Atualmente, as tubulações em cobre são as mais empregadas por atenderem bem as exigências requeridas e apresentarem um razoável custo-benefício. Estas tubulações são comumente isoladas com polietileno expandido para minimizar as perdas de calor para o ambiente.

2.3.4 Bomba hidráulica

A bomba hidráulica (Figura 11) é utilizada na impossibilidade de se instalar os coletores solares abaixo do reservatório térmico. Sua função é promover a circulação do fluido de trabalho entre esses dois componentes. As bombas hidráulicas mais empregadas em sistemas de pequeno porte variam de 1/25 a 1/4 cv e são geralmente do tipo centrífuga com rotor em bronze. Seu acionamento é feito, como dito anteriormente, por um controlador diferencial de temperatura.



Figura 11: Bomba hidráulica.
Fonte: Texius⁷.

2.3.5 Fonte auxiliar de energia

Embora o sistema de aquecimento de água por energia solar seja de acumulação, ele não é projetado para fornecer 100% da demanda de água quente durante todo o ano. Caso fosse, a instalação se tornaria superdimensionada o que a inviabilizaria do ponto de vista econômico. Por esse motivo, eles são comumente especificados para fornecer de 60 a 80% da energia térmica necessária (ABRAVA, 2008).

⁷ Disponível em: <<http://www.texius.com.br/images/residencial/3b.jpg>>. Acesso em: jul. 2013.

Para suprir o déficit de energia, essas instalações contam com uma fonte auxiliar. Este apoio pode estar localizado no interior do reservatório térmico (acumulação) ou em série com a saída de água para o consumo (passagem). No primeiro caso, o sistema auxiliar é constituído por uma ou mais resistências elétricas blindadas, acionadas automaticamente por meio de um termostato, ou manualmente, pelo próprio usuário. No segundo caso, o sistema auxiliar pode ser um aquecedor de passagem a gás ou elétrico (resistências elétricas).

O aquecedor de passagem a gás é constituído por uma unidade de aquecimento na qual há um queimador que permite a combustão adequada do gás, e um trocador de energia térmica que transfere o calor gerado para a água. Já os aquecedores de passagem elétricos são geralmente resistências elétricas e utilizam a energia dissipada por efeito joule para aquecer a água. Os aquecedores de passagem utilizados em sistemas solares normalmente contam com dispositivos de controle de temperatura e de potência, de modo a fornecer apenas a energia necessária para complementar o aquecimento (COMGÁS, 2011). A Figura 12 mostra o esquema de funcionamento de um sistema solar com apoio de aquecedores de passagem a gás liquefeito de petróleo (GLP).

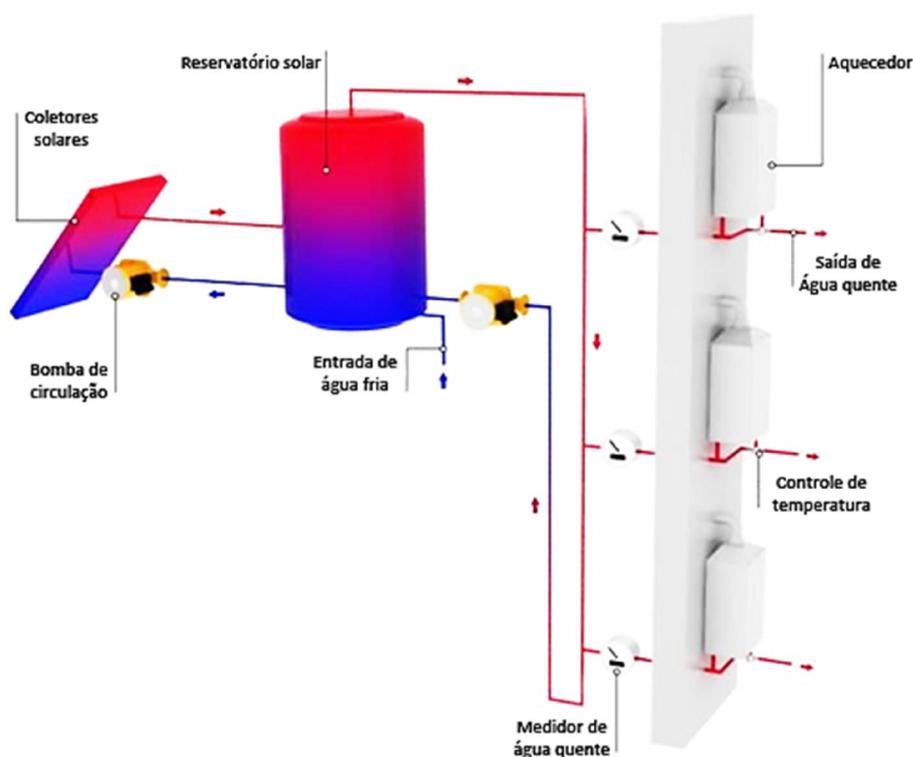


Figura 12: Sistema solar com aquecedores de passagem a gás.
Fonte: Adaptado de COMGÁS, 2011.

O aquecedor de passagem a gás também pode ser utilizado de modo conjugado ao reservatório térmico (Figura 13), sendo considerado, na prática, como um aquecedor de acumulação, uma vez que possui o mesmo princípio de funcionamento: o reservatório mantém armazenado um volume de água quente, a certa temperatura, disponível para uso (COMGÁS, 2011).

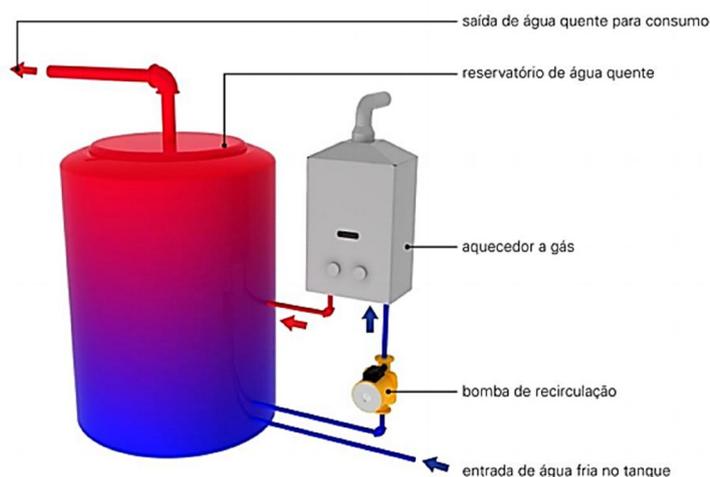


Figura 13: Sistema de aquecimento conjugado.
Fonte: COMGÁS, 2011.

2.4 Programas computacionais para dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água

Existem diversos programas para dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água. Cada programa tem sua particularidade, priorizando certos aspectos e aplicações. A seguir, apresenta-se uma pequena lista desses programas.

O *TermoDim* é uma ferramenta computacional brasileira, livre de custos, que permite determinar a área de coletores solares e o volume do reservatório térmico para sistemas de pequeno e grande porte operando em regime de termossifão. Este programa foi desenvolvido em Visual Basic como parte do trabalho de Doutorado de Antônio Siqueira (2003), e exige o conhecimento dos parâmetros geométricos do sistema, dos dados meteorológicos e de informações a respeito dos coletores solares e do perfil de consumo da edificação. O método de dimensionamento

utilizado pelo *TermoDim* foi elaborado a partir de uma série de simulações efetuadas com o *software TRNSYS (Transient System Simulation Program)*.

O *SolTerm* (LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2005) é um *software* comercial desenvolvido em Portugal que possibilita a simulação e o dimensionamento de sistemas solares de aquecimento de água operando em circulação forçada. O *software* também permite ao usuário realizar uma análise econômica, bem como determinar a contribuição destes sistemas na redução da emissão de CO₂ para a atmosfera. No *Solterm* estão disponíveis 16 sistemas para seleção. Esses sistemas incluem coletores solares, reservatórios térmicos, permutador de calor, motobombas, tubulações hidráulicas e aquecedores elétricos e a gás. O dimensionamento do sistema é realizado explorando uma sequência de (re)definição e/ou ajuste de componentes seguido de simulação energética e análise dos resultados até se estar satisfeito com o desempenho obtido para o projeto.

O *SolarEnergy* (COSTA, 2009) é outro *software* português, desenvolvido em *Visual Basic* e disponível gratuitamente, que realiza o dimensionamento e a simulação de sistemas solares ativos e passivos levando em consideração as características do local, a tipologia de utilização do sistema, o perfil de consumo, os dados do coletor solar entre outros parâmetros. O *SolarEnergy* utiliza como metodologia de cálculo o *F-Chart* e também realiza a análise de viabilidade econômica dos sistemas dimensionados.

O *Helios-Chart* (SOUZA, 2009) é um programa comercial brasileiro, desenvolvido em C++, que realiza a simulação, o dimensionamento e a análise econômica de sistemas solares ativos para instalações de médio e grande porte utilizando o *F-Chart* como metodologia de cálculo. Os sistemas são dimensionados utilizando dados de equipamentos comerciais provenientes do PBE e dados de radiação solar do Atlas Solarimétrico Brasileiro.

Existem outras ferramentas para o dimensionamento de instalações solares térmicas, porém com maiores limitações, como o *RETScreen International* (2003) que é um aplicativo em *Microsoft Excel*, livre de custos, que realiza a análise de projetos de energias renováveis, tanto do ponto de vista do dimensionamento como da análise custo-benefício.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve a metodologia utilizada na confecção do aplicativo desenvolvido. Inicialmente são feitas algumas considerações sobre a concepção do aplicativo. Em seguida, são apresentados os componentes do sistema, o banco de dados e a sequência de cálculo.

A ideia central deste trabalho foi elaborar uma ferramenta, de interface amigável, que permitisse o dimensionamento de sistemas solares de aquecimento de água requerendo o mínimo de informação do usuário. Partindo desse princípio, chegou-se a uma configuração onde o usuário deve indicar o local, os detalhes geométricos da instalação, selecionar o modelo do coletor, a fonte auxiliar e inserir os dados de consumo de água quente da edificação. A partir disso, o programa oferece um dimensionamento, que pode ser modificado com base na análise econômica ou a critério do usuário.

O aplicativo foi desenvolvido no ambiente computacional MATLAB (*Matrix Laboratory, Mathworks, Inc.*, versão R2012a) e trabalha com sistemas de aquecimento solar de pequeno porte (demanda de até 1000 L.dia⁻¹), utilizando coletores planos ou coletores a vácuo do tipo U, em sistemas ativos ou sistemas passivos com reservatório térmico horizontal e fonte de energia auxiliar. Como fontes auxiliares são utilizadas a elétrica e o gás, podendo ser do tipo acumulação ou passagem. Para fins de comparação econômica, o aplicativo também dimensiona aquecedores estritamente elétricos ou a gás. Para o cálculo da área coletora e do volume do reservatório térmico são empregadas duas metodologias: a da “Carta F”, proposta por Duffie et. al. (1977), e a da NBR 15569 (ABNT, 2008). A metodologia da Carta-F já está bastante consolidada e é amplamente utilizada em projetos de aquecimento solar, e por esta razão foi adotada. A metodologia da NBR 15569 é uma simplificação da Carta-F e foi adotada para fins de comparação de resultados.

Inicialmente, foi elaborado um banco de dados com os valores de radiação solar e de temperatura do ar para alguns municípios do Paraná. Os dados de radiação solar foram obtidos do Atlas Solarimétrico Brasileiro, já os dados de temperatura do ar são provenientes do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR). Também foi confeccionado um banco de dados com as especificações técnicas, custo e desempenho de coletores solares, reservatórios térmicos, aquecedores de passagem e de acumulação. As especificações técnicas e o desempenho dos equipamentos são provenientes dos testes oficiais do Programa Brasileiro de

Etiquetagem (PBE) e o custo foi levantado a partir de pesquisa em mercado. O banco de dados foi elaborado utilizando o programa Microsoft Excel 2010.

A seguir são apresentados os modelos matemáticos utilizados no desenvolvimento do aplicativo.

3.1 Cálculo da demanda diária de água quente

Para calcular a demanda de água quente da edificação foi adotado o método das vazões nos pontos de consumo (NBR 5626, 1998). Este método consiste em realizar o levantamento dos consumos de cada aparelho sanitário que possui previsão de consumo de água quente. Nesse levantamento são verificadas as vazões de funcionamento desses aparelhos. O somatório da vazão de cada equipamento multiplicada pelo tempo médio de sua utilização e pela frequência de uso determina o volume de água quente a ser disponibilizada para o consumo na edificação. A Tabela 1 apresenta valores típicos para uso residencial.

Tabela 1: Vazão nos pontos de utilização em função do aparelho sanitário

Peça de utilização	Vazão (L.min ⁻¹)
Banheira	18
Bidê	6
Chuveiro ou ducha	6 a 12
Lavadora de pratos ou de roupas	18
Lavabo	9
Pia da cozinha	6 a 15
Tanque	15

Fonte: NBR 5626, 1998.

A princípio, o aplicativo desenvolvido se restringirá a finalidade “banho”. Assim, para calcular a demanda diária de água quente foi utilizada a Equação 1:

$$V_c = Q_d \cdot t_b \cdot N_b \quad (1)$$

Onde:

V_c = volume total de água quente consumido na edificação (L.dia⁻¹);

Q_d = vazão da ducha (L.min⁻¹);

t_b = tempo médio de cada banho (min);

N_b = total de banhos diários.

O algoritmo desenvolvido considera que a duração média de cada banho é de aproximadamente 10 minutos. Também permite selecionar até 10 banhos diários e vazões de no máximo $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (valor recomendado pela ABRAVA).

3.2 Cálculo da demanda mensal de energia

A demanda de energia para aquecer o volume de água ao final do mês foi calculada mediante a utilização da Equação 2 (ABRAVA, 2008).

$$E_i = V_c \cdot N_d \cdot \rho \cdot c_p (T_c - T_a) \quad (2)$$

Onde:

E_i = energia útil para aquecimento da água ($\text{kWh}\cdot\text{mês}^{-1}$);

V_c = volume total de água quente consumido na edificação ($\text{L}\cdot\text{dia}^{-1}$);

N_d = número de dias do mês correspondente;

ρ = massa específica da água ($1 \text{ Kg}\cdot\text{L}^{-1}$);

c_p = calor específico da água ($0,001163 \text{ kWh}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$);

T_c = temperatura de consumo (°C);

T_a = temperatura ambiente média mensal do local de instalação (°C).

No caso dos sistemas que utilizam aquecedores de acumulação a T_c é substituída pela temperatura de armazenamento da água (T_{arm}), correspondente a 45°C .

3.3 Dimensionamento dos aquecedores de passagem elétricos

A potência nominal do aquecedor de passagem elétrico foi calculada mediante a seguinte equação (ABRAVA, 2008):

$$P_{APE} = \dot{m}_{max} \cdot c_p \cdot (T_c - T_{am}) \quad (3)$$

Onde:

P_{APE} = potência nominal do aquecedor de passagem elétrico (kW);

\dot{m}_{max} = vazão máxima de água da instalação ($\text{Kg}\cdot\text{h}^{-1}$);

T_{am} = temperatura ambiente média anual (°C).

Após calcular a potência do aquecedor, o aplicativo busca no banco de dados os equipamentos com potência entre 0,9 a 1,2 do valor calculado. Caso não encontre um equipamento dentro dessa faixa, o aplicativo seleciona o aquecedor de potência nominal imediatamente superior à calculada.

Por sua vez, o consumo mensal de energia do aquecedor elétrico foi calculado utilizando a Equação 4:

$$C_{APE} = \frac{E_i}{\eta_{APE}} \quad (4)$$

Onde:

C_{APE} = consumo médio mensal de energia do aquecedor elétrico (kWh.mês⁻¹);

E_i = energia útil para aquecimento da água (kWh.mês⁻¹);

η_{APE} = rendimento do aquecedor elétrico (decimal).

3.4 Dimensionamento dos aquecedores de passagem a gás

A potência nominal do aquecedor de passagem a gás foi calculada por meio da seguinte expressão (COMGÁS, 2011):

$$P_{APG} = \dot{m}_{max} \cdot c_p \cdot (T_c - T_{am}) \quad (5)$$

Onde:

P_{APG} = potência nominal do aquecedor de passagem a gás (kW).

Já o consumo mensal de energia do aquecedor de passagem a gás foi calculado utilizando a equação abaixo:

$$C_{APG} = \frac{E_i}{\eta_{APG}} \quad (6)$$

Onde:

C_{APG} = consumo médio mensal de energia do aquecedor a gás (kWh.mês⁻¹);

η_{APG} = rendimento do aquecedor a gás (decimal).

3.5 Dimensionamento dos aquecedores de acumulação elétricos

A potência nominal do aquecedor de acumulação elétrico foi calculada por meio da Equação 7 (ABRAVA, 2008).

$$P_{AAE} = \frac{\frac{V_{arm}}{3} \cdot c_p \cdot (T_c - T_{am})}{t_{aq}} \quad (7)$$

Onde:

P_{AAE} = potência nominal do aquecedor de acumulação elétrico (kW);

V_{arm} = volume de armazenamento (Kg);

t_{aq} = tempo de aquecimento (h).

Para calcular o consumo mensal de energia do aquecedor de acumulação elétrico foi utilizado a Equação 8:

$$C_{AAE} = \frac{E_i}{\eta_{AAE}} \quad (8)$$

Onde:

C_{AAE} = consumo médio mensal de energia do aquecedor elétrico (kWh.mês⁻¹);

η_{AAE} = rendimento do aquecedor elétrico (decimal).

3.6 Dimensionamento dos aquecedores de acumulação a gás

A potência nominal do aquecedor de acumulação a gás foi calculada por meio da seguinte expressão (COMGÁS, 2011):

$$P_{AAG} = \frac{V_{arm} \cdot c_p \cdot (T_c - T_{am})}{t_{aq}} \quad (9)$$

Onde:

P_{AAG} = potência nominal do aquecedor de acumulação a gás (kW);

V_{arm} = volume de armazenamento (Kg).

Já o consumo mensal de energia do aquecedor de acumulação a gás foi calculado utilizando a Equação 10:

$$C_{AAG} = \frac{E_i}{\eta_{AAG}} \quad (10)$$

Onde:

C_{AAG} = consumo médio mensal de energia do aquecedor a gás (kWh.mês⁻¹);

η_{AAG} = rendimento do aquecedor a gás (decimal).

3.7 Cálculo da área coletora e do volume do reservatório térmico

3.7.1 Metodologia da Carta F

Esta metodologia foi desenvolvida por Duffie et. al. (1977) com base na compilação e consolidação dos resultados de várias simulações matemáticas realizadas no *software TRNSYS* e avaliações de condições operacionais reais de instalações de aquecimento solar. O método da Carta F pode ser utilizado tanto no projeto de sistemas passivos quanto no de sistemas ativos.

Para calcular a área coletora, esta metodologia exige a seleção prévia do modelo de coletor solar e o conhecimento dos dados meteorológicos e da demanda de energia do local de instalação. Com essas informações pode-se obter a área coletora por meio de correlações entre a contribuição da energia solar (fração solar) e a demanda mensal de energia para o aquecimento de água. A fração solar para análises mensais é expressa pela Equação 11.

$$f_i = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (11)$$

Onde:

f_i = fração solar mensal para o mês correspondente.

O parâmetro X está relacionado às perdas térmicas do coletor solar, conforme Equação 12:

$$X = \frac{A_C \cdot F_R U_L \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t_i}{E_i} \cdot \left(\frac{C_{ad}}{C_{ap}} \right)^{-0,25} \quad (12)$$

Onde:

A_C = área total de coletores solares (m²);

$F_R U_L$ = produto do fator de remoção de calor pelo coeficiente global de perdas térmicas do coletor solar, correspondente à inclinação da curva de eficiência térmica instantânea ($\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$);

T_{ref} = temperatura de referência, considerada constante, e igual a 100°C ;

Δt_i = duração do mês (h);

C_{ad} = capacidade específica de armazenamento desejada ($\text{L}\cdot\text{m}^{-2}$);

C_{ap} = capacidade específica de armazenamento adotado pelo método da Carta-F, correspondente a $75 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$.

O parâmetro X necessita ser corrigido devido à diversidade da situação brasileira frente à realidade americana, no que se refere à necessidade de aquecimento de água e do ambiente na maioria das residências. Quando o uso da energia solar restringe-se somente ao aquecimento da água, Duffie e Beckman (2006) propuseram a correção mostrada na Equação 13.

$$X_C = X \cdot \left(\frac{11,6 + 3,86T_{rede} + 1,18T_c - 2,32T_a}{100 - T_a} \right) \quad (13)$$

Onde:

T_{rede} = temperatura na qual a água é admitida na rede pública ($^\circ\text{C}$);

T_c = temperatura da água de consumo ($^\circ\text{C}$);

T_a = temperatura ambiente média mensal do local de instalação ($^\circ\text{C}$).

O parâmetro Y está relacionado com a energia absorvida pela placa do coletor, conforme Equação 14:

$$Y = \frac{A_C \cdot F_R (\tau_c \alpha_p)_\theta \cdot H_T \cdot N_d}{E_i} \quad (14)$$

$F_R (\tau_c \alpha_p)_\theta$ = produto do fator de remoção, transmissividade do vidro e absorvidade da tinta dos coletores, para ângulo médio de incidência da radiação direta;

H_T = radiação solar global diária em média mensal incidente no plano do coletor por unidade de área ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$).

Para calcular a radiação solar global incidente sobre a superfície inclinada foi utilizado a Equação 15 (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Esta equação implica em uma série de cálculos apresentados adiante.

$$H_T = H \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + H\rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (15)$$

Onde:

H = radiação solar horizontal diária em média mensal ($\text{kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

H_d = radiação solar difusa incidente no plano inclinado ($\text{kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

ρ = refletância da vizinhança nas proximidades do coletor solar (adotou-se $\rho = 0,25$. De acordo com IQBAL (1983), valores entre 0,20 e 0,25 contemplam o índice de reflexão da maior parte das superfícies terrestres);

R_b = razão entre a radiação extraterrestre incidente no plano inclinado e na horizontal, calculada pela Equação 16:

$$R_b = \frac{\text{sen}\delta(\text{sen}\phi\cos\beta - \cos\phi\text{sen}\beta\cos\gamma) + \cos\omega'_s\cos\delta(\cos\phi\cos\beta + \text{sen}\phi\text{sen}\beta\cos\gamma) + \cos\delta\text{sen}\beta\text{sen}\gamma\text{sen}\omega'_s}{\text{sen}\delta\text{sen}\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega_s} \quad (16)$$

Onde:

δ = declinação solar ($^\circ$), corresponde a posição angular do sol ao meio-dia solar em relação ao plano do Equador;

ϕ = latitude ($^\circ$), corresponde à posição angular (ao norte ou ao sul) em relação à linha do Equador (definida como latitude zero);

β = inclinação do coletor ($^\circ$), corresponde ao ângulo entre o plano da superfície do coletor e a horizontal;

γ = ângulo azimutal da superfície ($^\circ$), corresponde ao ângulo formado entre a direção norte-sul e a projeção no plano horizontal da normal à superfície do coletor solar;

ω_s – ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície horizontal ($^\circ$);

ω'_s – ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície inclinada ($^\circ$).

A declinação solar foi calculada por meio da Equação 17:

$$\delta = 23,45^{\circ} \operatorname{sen} \left(2\pi \cdot \frac{284 + d}{365} \right) \quad (17)$$

Onde:

d = dia do ano, igual a unidade, em 1° de janeiro.

Para minimizar o erro do valor que representa a radiação solar diária em média mensal, utilizou-se o dia médio de cada mês (Tabela 2).

Tabela 2: Dia médio do mês

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Dia	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10

Fonte: KLEIN, 1977.

O ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície horizontal, em graus, foi obtido utilizando a Equação 18.

$$\omega_s = \operatorname{arc} \cos(-\operatorname{tg}\phi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (18)$$

Já o ângulo horário do pôr-do-sol ajustado para a superfície inclinada foi calculado por:

$$\omega'_s = \operatorname{mínimo} \left[\frac{\operatorname{arc} \cos(-\operatorname{tg}\phi \cdot \operatorname{tg}\delta)}{\operatorname{arc} \cos(-\operatorname{tg}(\phi + \beta) \cdot \operatorname{tg}\delta)} \right] \quad (19)$$

Para calcular o segundo termo da Equação 15 é necessário, inicialmente, calcular a radiação solar extraterrestre (H_0), dada pela Equação 20.

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2\pi d}{365} \right) \right] (\cos\phi \cos\delta \operatorname{sen}\omega_s + \omega_s \operatorname{sen}\phi \operatorname{sen}\delta) \quad (20)$$

Onde:

$$G_{sc} = 1,367 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2};$$

H_0 = radiação solar extraterrestre, corresponde à radiação incidente no topo da atmosfera.

Em seguida é preciso decompor a radiação solar em suas componentes direta e difusa. Para isso, deve-se calcular o índice de claridade em média mensal (K_T), definido pela Equação 21.

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (21)$$

Por fim, calcula-se a H_d utilizando a Equação 22 (COLLARES-PEREIRA; RABL 1979).

$$\frac{H_d}{H} = 0,775 + 0,00606 \cdot (\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455 \cdot (\omega_s - 90)] \cdot \cos(115K_T - 103) \quad (22)$$

Após corrigir a radiação solar e obter os parâmetros X e Y calcula-se a fração solar mensal. Por sua vez, a fração solar anual será obtida a partir da média ponderada das contribuições mensais de aquecimento solar e da demanda de energia (Equação 23).

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{12} f_i E_i}{\sum_{i=1}^{12} E_i} \quad (23)$$

Onde:

F = fração solar anual.

Para chegar à área de coletores solares o algoritmo desenvolvido calcula, inicialmente, o volume do reservatório térmico (V_{RT}) utilizando a relação abaixo:

$$0,75 \leq \frac{V_{RT}}{V_c} \leq 1,25 \quad (24)$$

Em seguida o aplicativo busca no banco de dados o reservatório comercial que atende às exigências da Equação 24. Na sequência varia a C_{ad} de 50 a 250 L.m⁻² (com incrementos de 10 L.m⁻²) e calcula a área coletora. Para cada valor de área encontrado o algoritmo calcula a fração solar anual e depois realiza uma análise econômica para encontrar o sistema com o menor custo anual, ou seja, o algoritmo encontra a área coletora ótima de acordo com a configuração do sistema.

3.7.2 Metodologia da NBR 15569

Esta metodologia é uma simplificação do método da Carta-F e foi elaborada considerando uma fração solar anual teórica de 70%. De modo similar à primeira, é preciso selecionar previamente o modelo de coletor solar, conhecer os dados meteorológicos e a demanda de energia do local de instalação. A partir disso, a área coletora (A_c) é obtida por meio da Equação 25.

$$A_c = \frac{\sum_{i=1}^{12} (E_i + E_p) S}{\sum_{i=1}^{12} E_M} \quad (25)$$

Onde:

E_i = energia útil para aquecimento da água (kWh.mês⁻¹);

E_p = somatório das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário (kWh.mês⁻¹), calculada pela Equação 26.

$$E_p = 0,15E_i \quad (26)$$

S = fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar, dado pelas Equações 27 (para $15^\circ < \beta < 90^\circ$) e 28 (para $\beta < 15^\circ$).

$$S = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4}(\beta - \beta_o)^2 + 3,5 \times 10^{-5}\gamma^2]} \quad (27)$$

$$S = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4}(\beta - \beta_o)^2]} \quad (28)$$

Onde:

β = inclinação do coletor em relação ao plano horizontal (°);

β_o = inclinação ótima do coletor para o local de instalação (°) (latitude + 10°);

γ = ângulo de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico (°).

E_M = produção média mensal de energia específica do coletor solar (kWh.m^{-2}), calculada pela Equação 29.

$$E_M = [F_R(\tau_c \alpha_p)_\theta - (0,0249F_R U_L)] \cdot H \cdot N_d \quad (29)$$

Onde:

H = radiação solar horizontal diária em média mensal ($\text{kWh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

N_d = número de dias do mês correspondente.

Para dimensionar o reservatório térmico, a NBR utiliza a seguinte relação:

$$V_R \geq 0,75 V_c \quad (30)$$

Onde:

V_R = volume do reservatório de água quente (L);

V_c = volume diário de água quente consumido (L).

3.8 Dimensionamento do sistema auxiliar de aquecimento

A potência do sistema de aquecimento auxiliar (elétrico ou a gás) foi calculada utilizando as equações 3, 5, 7 e 9, apresentadas anteriormente. Já a demanda mensal de energia auxiliar foi calculada utilizando a equação abaixo (ABRAVA, 2008):

$$E_{aux} = (1 - f_i)E_i \quad (31)$$

Onde:

E_{aux} = energia auxiliar do sistema de aquecimento solar (kWh.mês^{-1});

f_i = fração solar do mês correspondente.

3.9 Determinação do tipo de circulação e da pressão de operação do sistema

Para especificar o tipo de circulação do sistema solar foram utilizadas as relações matemáticas exibidas na Figura 14 e as considerações apresentadas na sequência.

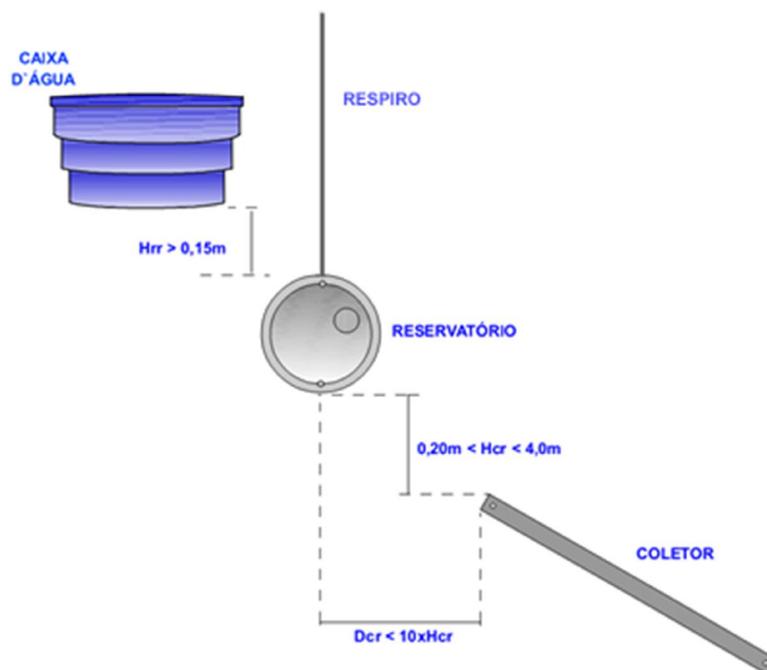


Figura 14: Distâncias recomendadas para um sistema em termosifão.
Fonte: ABRAVA, 2008.

Onde:

H_{rr} = altura entre o fundo da caixa de água fria e o topo do reservatório térmico (m);

H_{cr} = altura entre o fundo do reservatório térmico e a parte superior dos coletores (m);

D_{cr} = distância entre a parte central do reservatório térmico e a parte superior dos coletores (m).

Segundo a ABRAVA (2008), para um sistema ser enquadrado na configuração termosifão ele deverá, além de atender as medidas mínimas e máximas apresentadas na Figura 14, ter um reservatório térmico com volume inferior a 1200 litros e área coletora total menor que 12 m². Do contrário, o sistema é considerado como de circulação forçada.

Com relação à pressão de operação, o sistema será considerado de alta pressão se a H_{rr} for maior do que 5 metros (ABRAVA, 2008). Nesse caso serão empregados equipamentos que atendam a essa particularidade.

3.10 Análise econômica

A análise econômica dos sistemas dimensionados foi feita a partir do levantamento dos custos de aquisição, de instalação, de manutenção e de consumo de energia auxiliar. O custo de aquisição contempla o custo dos coletores solares, do reservatório térmico, do sistema de aquecimento auxiliar, das tubulações de água quente, dos acessórios e, eventualmente, da bomba hidráulica. Os custos de instalação e de manutenção são calculados com base em um percentual sobre o custo de aquisição do sistema. Já o custo com energia leva em conta o consumo mensal de energia e a tarifa de energia do sistema auxiliar. Todos os custos são anualizados a partir da vida útil dos equipamentos e da taxa de juros.

Para identificar a atratividade do empreendimento, é feita uma comparação entre os custos gerados com o sistema solar e os custos gerados com um sistema de aquecimento convencional equivalente. Como critérios de decisão são utilizados a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback* Descontado (PBD).

A TIR é a taxa de juros que iguala, em determinado momento do tempo, o valor presente das entradas com o das saídas previstas de caixa. Em outras palavras, a TIR é a taxa que o empreendedor obtém a cada ano sobre o capital investido no projeto, enquanto o investimento inicial é recuperado progressivamente. A TIR foi obtida por meio da Equação 32 (CASAROTTO FILHO e KOPITTKKE, 2010):

$$I_0 - \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1 + TIR)^i} = 0 \quad (32)$$

Onde:

TIR = taxa interna de retorno (decimal);

I_0 = investimento inicial (R\$);

i = tempo de desconto de cada entrada de caixa (anos);

n = tempo de desconto do último fluxo de caixa (anos);

FC = fluxo de caixa por período.

Se a TIR for maior que o custo de capital (taxa mínima de atratividade - TMA) o investimento é considerado economicamente viável.

O PBD calcula o tempo de retorno do capital investimento, ou seja, o tempo necessário para o investimento se pagar e começar a dar lucro, considerando o efeito de se trazer o fluxo de caixa a valor presente, descontado pela TMA. O PBD é calculado utilizando a equação abaixo (NEWNAN et al., 2011):

$$PBD = \frac{\ln\left(\frac{U}{U - P \cdot TMA}\right)}{\ln(1 + TMA)} \quad (33)$$

Onde:

U = retorno líquido anual do investimento (R\$);

P = valor presente (R\$);

TMA = taxa mínima de atratividade (decimal).

A alternativa é considerada economicamente viável se o PBD for menor que a vida útil do empreendimento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aplicativo Solardim

Este item apresenta a estrutura e o princípio de funcionamento do aplicativo desenvolvido neste trabalho, batizado com o nome de Solardim. Ao final desta seção, espera-se que o leitor tenha uma maior percepção das capacidades e da funcionalidade do programa.

O Solardim foi concebido para ser uma ferramenta capaz de auxiliar no dimensionamento e na análise econômica de sistemas solares de aquecimento de água de pequeno porte. O modelo matemático utilizado pelo aplicativo permite dimensionar e analisar de forma rápida e precisa sistemas com até 1000 litros de demanda diária de água quente. O algoritmo está estruturado de modo a minimizar a intervenção do usuário, ficando ao seu encargo a seleção e a inserção de parâmetros específicos para cada configuração. O aplicativo também pode ser visto como uma alternativa ao uso de métodos de cálculo pouco rigorosos e/ou muito demorados.

Na Figura 15, é apresentado um fluxograma simplificado do princípio de funcionamento do Solardim. Por meio deste fluxograma é possível ter uma noção da mecânica utilizada na sua construção.

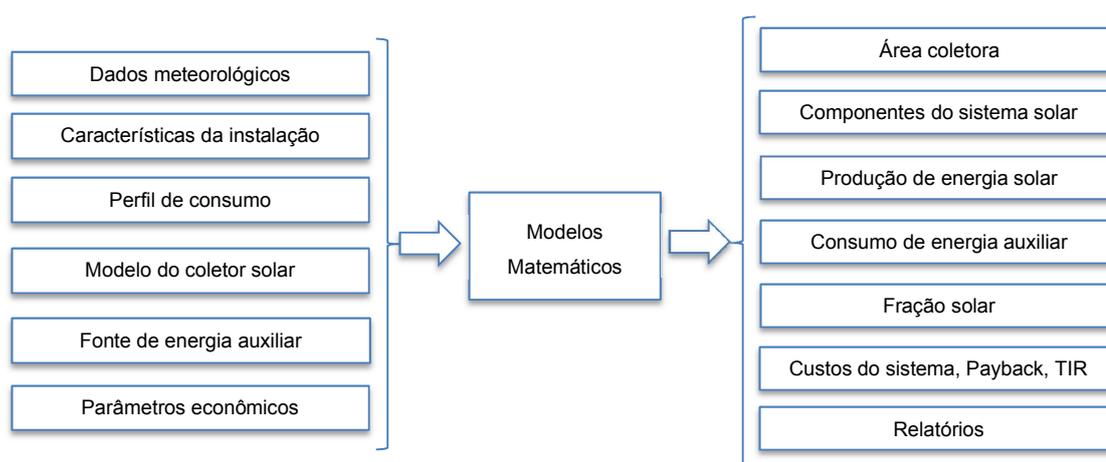


Figura 15: Diagrama de blocos do aplicativo desenvolvido.

O Solardim está dividido em quatro partes principais. A primeira delas, designada por Elementos Locais, é onde o usuário seleciona a localidade e posiciona os coletores solares. Na segunda parte, denominada por Sistema Solar, o usuário introduz as particularidades do sistema, tais como: geometria da instalação, características dos componentes e perfil de consumo. Ou seja, nesta seção é inserida a informação necessária para que o aplicativo realize o dimensionamento. Na terceira parte, denominada Resultados, são apresentados os resultados do dimensionamento para as duas metodologias de cálculo utilizadas (NBR 15569 e Carta-F). Nesta seção o usuário também pode selecionar o reservatório térmico e o aquecedor auxiliar de sua preferência. Na última parte, designada por Análise Econômica, o aplicativo permite realizar a análise econômica do sistema dimensionado. Para isto, basta que o utilizador ajuste os parâmetros econômicos.

A seguir é apresentada uma descrição mais detalhada dos módulos do aplicativo desenvolvido.

Ao iniciar o Solardim, a tela da Figura 16 é exibida. Esta tela tem apenas um caráter introdutório. Para avançar, é preciso clicar em “Continuar”.



Figura 16: Tela inicial do Solardim.

Após a introdução do aplicativo surge a janela “Elementos Locais”, mostrada na Figura 17.



Figura 17: Elementos Locais.

Nesta janela, o usuário deverá selecionar a localidade pretendida e ajustar a orientação do coletor solar. Para selecionar a localidade é preciso clicar sobre o menu “Cidade/Estado”. Feito isso, o Solardim mostra a altitude, a latitude, a longitude, a temperatura ambiente e a radiação solar horizontal em média mensal da cidade selecionada. A princípio estão disponíveis oito municípios, todavia, é possível inserir outros clicando no botão “Nova localidade”. Caso faça isto, o usuário será redirecionado para uma janela onde poderá inserir os dados meteorológicos, a localização e a identificação do novo local.

Para posicionar o coletor solar, o usuário deverá ajustar as barras de rolagem na parte inferior da tela. Inicialmente o aplicativo estabelece que a inclinação do coletor é igual à latitude da cidade e o desvio azimutal é 0, mas é possível selecionar inclinações de 0 a 90° e desvios de até 30° em relação ao norte geográfico. O aplicativo oferece ainda a opção “Otimizar para o inverno”. Se esta

opção for selecionada, a inclinação do coletor passará a ser igual à latitude da cidade + 10°. Por fim, também é possível visualizar, em tempo real, a influência da orientação do coletor na captação da radiação solar por meio do gráfico de radiação solar corrigida.

Após inserir as informações iniciais, o usuário deve clicar na barra superior do Solardim para avançar para a próxima janela (Figura 18).

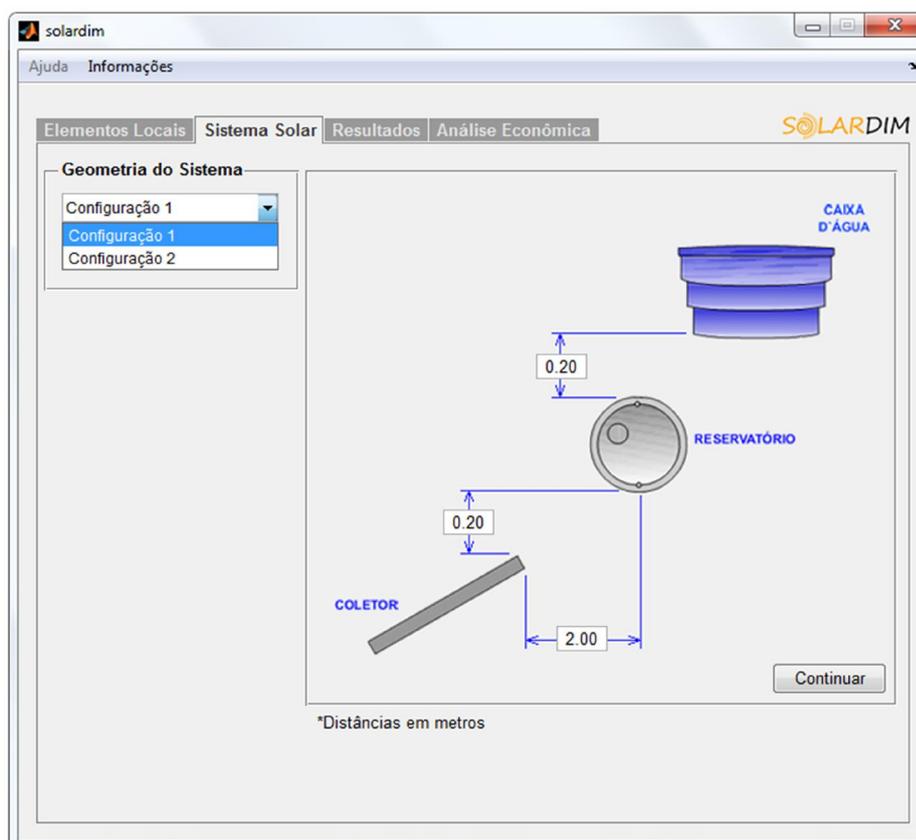


Figura 18: Geometria do sistema.

Na janela “Sistema Solar”, o utilizador deve, inicialmente, inserir o espaçamento entre os componentes do sistema solar. Os valores inseridos serão utilizados para determinar a pressão do reservatório térmico e o tipo de circulação do sistema. Como nem sempre é possível ter esses valores, o aplicativo fornece valores padrões para cada configuração. A princípio o Solardim dispõe de apenas duas configurações: 1 - coletor solar acima do reservatório térmico; 2 – coletor solar abaixo do reservatório térmico. Após inserir os valores, o usuário deverá clicar em “Continuar” para prosseguir.

A próxima janela (Figura 19) se refere ao sistema solar propriamente dito e contempla os seguintes módulos: Coletor solar, Reservatório térmico (Boiler), Aquecedor Auxiliar (Apoio) e Consumo. Primeiramente, o usuário deverá selecionar o tipo de aquecedor auxiliar que será utilizado (aquecedor de passagem ou de acumulação). Com base nesta escolha serão apresentados, em cada módulo, os equipamentos apropriados.

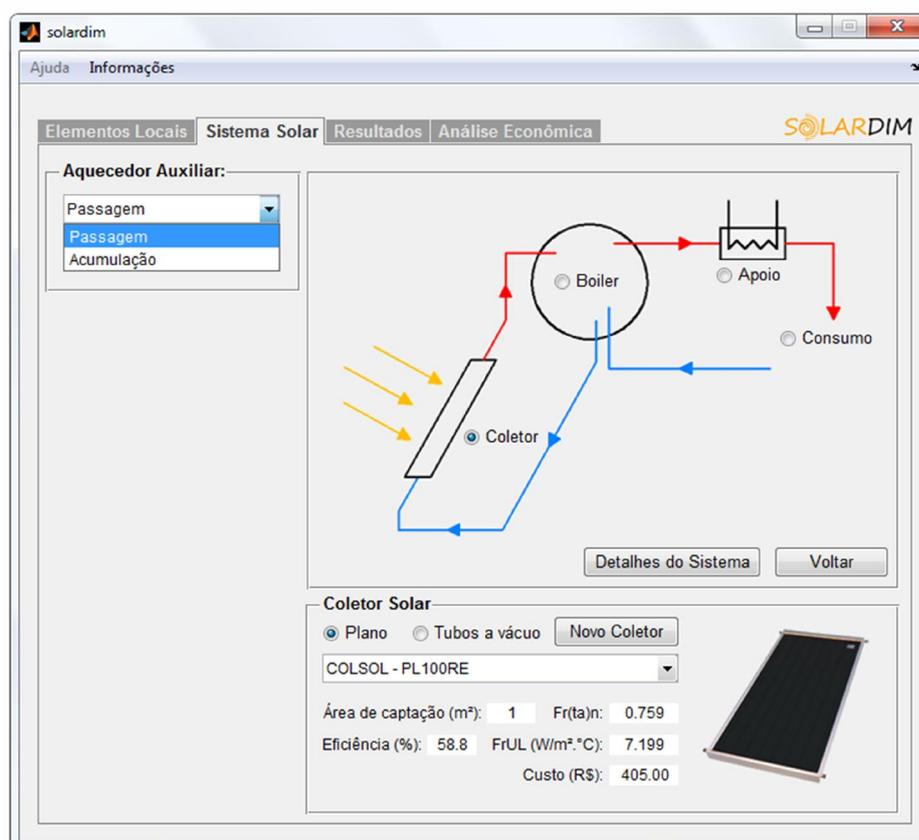


Figura 19: Sistema solar.

No módulo denominado por Coletor Solar, o usuário deverá selecionar o tipo de coletor (plano ou tubos a vácuo) e em seguida escolher um modelo da lista apresentada. Esta lista contém alguns modelos de coletores disponíveis no mercado. Ao selecionar um modelo, o aplicativo automaticamente mostra as características do mesmo, tais como: área de captação, eficiência energética média, resistividade térmica e rendimento óptico. Caso o usuário não encontre o coletor desejado, ele poderá inserir um novo coletor. Para isto, basta clicar no botão “Novo Coletor” e introduzir as características do mesmo. O aplicativo utilizará as características do coletor selecionado para realizar o cálculo da área coletora total.

No módulo designado por Reservatório Térmico (Figura 20), o usuário poderá visualizar os modelos de reservatórios disponíveis no banco de dados. Os modelos serão apresentados segundo a pressão de trabalho do sistema, definida por meio da diferença de altura entre o fundo da caixa de água e o topo do boiler. A escolha dos reservatórios térmicos ficará por conta do Solardim, que selecionará os modelos mais apropriados para o perfil de consumo da edificação. Entretanto, o usuário poderá inserir um novo reservatório térmico clicando no botão “Novo Reservatório”. Na janela que surgirá, o utilizador deverá especificar as características do novo equipamento e depois clicar no botão “Salvar” para gravá-lo no banco de dados.

Reservatório Térmico

Reservatórios de Baixa Pressão: Novo Reservatório

	Marca/Modelo	Volume (litros)	Custo (R\$)
1	CUMULUS - VITREX BP 200	200	1270.00
2	CUMULUS - VITREX BP 300	300	1415.00
3	CUMULUS - VITREX BP 400	400	1575.00
4	CUMULUS - VITREX BP 500	500	1750.00
5	CUMULUS - VITREX BP 600	600	1945.00



Figura 20: Reservatório térmico.

O próximo módulo se refere ao sistema auxiliar (Figura 21). Neste módulo, o usuário deverá designar o tipo de fonte de energia que servirá de complemento ao sistema solar. Os equipamentos disponíveis no banco de dados serão exibidos de acordo com a fonte selecionada. De modo similar aos reservatórios térmicos, o Solardim escolherá os modelos mais apropriados ao perfil de consumo da edificação. O usuário também poderá inserir novos equipamentos clicando no botão “Novo Aquecedor”.

Aquecedor Auxiliar de Passagem

Elétrico (127V)
 Elétrico (220V)
 Gás (GLP)
 Novo Aquecedor

	Marca/Modelo	Potência (W)	Custo (R\$)
1	FAME - SUPER DUCHA ELETRÔNICA	5400	80.00
2	LORENZETTI - DUO SHOWER ELETRÔNICA ...	5500	190.00
3	LORENZETTI - JET TURBO MULTITEMPERAT...	5400	400.00
4	LORENZETTI - JET CONTROL ELETRÔNICA	5500	140.00
5	LORENZETTI - DUCHA ADVANCED ELETRÔ...	5500	120.00



Figura 21: Aquecedor auxiliar.

No módulo referente ao consumo de água quente da edificação (Figura 22), o usuário deverá selecionar a temperatura da água de consumo (38 a 40°C), o total de banhos diários (1 a 10 banhos), a vazão da ducha (1 a 10 l/min) e, eventualmente, o número de duchas acionadas simultaneamente (até 3 duchas). Na versão atual, o Solardim conta apenas com a aplicação “Banho”.

Consumo

Aplicação

Banho
 Outra

Temperatura da água de consumo (°C): 40

Banhos/dia: 5 Vazão da ducha (l/min): 6

Duchas acionadas simultaneamente: 0

Figura 22: Consumo de água quente da edificação.

Após inserir as características do sistema solar, o usuário deverá clicar na aba “Resultados” (Figura 23).

solardim

Ajuda Informações

Elementos Locais Sistema Solar Resultados Análise Econômica

Método da NBR 15569

Demanda diária de água quente (litros): 300 Reservatório Térmico: CUMULUS - VITREX BP 300

Coletor Solar: COLSOL - PL100RE Número de coletores: 4 Área coletora total (m²): 4

Aquecedor Auxiliar: LORENZETTI - DUCHA ELETRÔNICA 7700

Demanda total de Energia (kWh/ano): 3240.97 Produção Energética Solar (kWh/ano): 2578.63

Gerar Relatório Produção Energética do Aquecedor Auxiliar (kWh/ano): 560.22

Método da CARTA-F

Demanda diária de água quente (litros): 300 Reservatório Térmico: CUMULUS - VITREX BP 300

Coletor Solar: COLSOL - PL100RE Número de coletores: 4 Área coletora total (m²): 4

Fração Solar: 0.80 Aquecedor Auxiliar: LORENZETTI - DUCHA ELETRÔNICA 7700

Demanda total de Energia (kWh/ano): 3240.97 Produção Energética Solar (kWh/ano): 2578.63

Gerar Relatório Produção Energética do Aquecedor Auxiliar (kWh/ano): 560.22

Figura 23: Resultados do dimensionamento.

Na aba referente aos resultados, são exibidos os resultados do dimensionamento utilizando tanto o método da NBR 15569 quanto o método da Carta-F. Estes resultados incluem a área coletora total, a fração solar, a produção energética do sistema solar, a produção energética do aquecedor auxiliar e os equipamentos selecionados pelo aplicativo. O usuário possui a liberdade de escolher um dos reservatórios térmicos e um dos aquecedores auxiliares que foram previamente enquadrados pelo Solardim. O aplicativo também oferece a opção de gravar o resultado do dimensionamento. Para isso, é necessário clicar no botão “Gerar Relatório”. O relatório contém informações detalhadas de cada sistema dimensionado.

Na última janela (Figura 24), o usuário tem a possibilidade de realizar uma análise econômica do sistema dimensionado. Para isto, deve ajustar os parâmetros econômicos de acordo com os valores praticados na sua região. Estes parâmetros incluem o preço da energia auxiliar, a taxa de juros e os custos de operação e de instalação do sistema. O resultado de cada alteração poderá ser visualizado, em tempo real, na parte inferior da tela. O usuário também tem a opção de salvar a análise econômica clicando no botão “Gerar Relatório”.

The screenshot shows the 'Análise Econômica' window in the Solardim application. The window title is 'solardim' and it has a menu bar with 'Ajuda' and 'Informações'. The main content area is divided into several sections:

- Taxas, custos e tarifas:**
 - Tarifa de Energia Elétrica (R\$/kWh): 0.40
 - Custo do GLP (R\$/Kg): 3.20
 - Taxa anual de juros (%): 10.0
 - Manutenção anual do Sistema Solar (% do custo inicial): 2.0
 - Manutenção anual do Sistema a Gás (% do custo inicial): 15.0
 - Custo de instalação (% do custo inicial): 15.0
- NBR 15569:**
 - Custo inicial dos equipamentos (R\$): 3580.25
 - Custo inicial anualizado (R\$/ano): 461.82
 - Custo de manutenção anual (R\$/ano): 71.61
 - Custo com Energia Elétrica (R\$/ano): 224.09
 - Custo com GLP (R\$/ano): 0.00
 - Custo anual total (R\$/ano): 757.51
- Carta-F:**
 - Custo inicial dos equipamentos (R\$): 3580.25
 - Custo inicial anualizado (R\$/ano): 461.82
 - Custo de manutenção anual (R\$/ano): 71.61
 - Custo com Energia Elétrica (R\$/ano): 224.09
 - Custo com GLP (R\$/ano): 0.00
 - Custo anual total (R\$/ano): 757.51

Below these sections, there are two comparison areas:

- Comparação com sistema elétrico (NBR 15569):**
 - Taxa Interna de Retorno (%): 22.61
 - Tempo de Retorno (anos): 6
- Comparação com sistema elétrico (Carta-F):**
 - Taxa Interna de Retorno (%): 22.61
 - Tempo de Retorno (anos): 6

At the bottom of the window, there are two buttons: 'Gerar Relatório' and 'Economicamente Viável'.

Figura 24: Análise Econômica.

4.2 Exemplos de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar de água

Este item tem por objetivo fazer uma demonstração prática do aplicativo desenvolvido. Para isto, foram dimensionados e analisados seis sistemas de aquecimento solar (Tabela 3). Os sistemas diferem basicamente quanto à fonte auxiliar de energia, ao tipo de circulação e modelo do coletor.

Tabela 3: Configurações dos sistemas solares

Sistema	Fonte Auxiliar	Circulação	Coletor Solar		
			Tipo	$F_R(\tau_c\alpha_p)_\theta$	F_RU_L ($W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$)
1	Elétrica (220 V) - Passagem	Natural	Plano	0.759	7.199
2	GLP - Passagem	Natural	Plano	0.759	7.199
3	Elétrica (220 V) – Acumulação	Forçada	Plano	0.759	7.199
4	GLP – Acumulação	Forçada	Plano	0.759	7.199
5	Elétrica (220 V) – Passagem	Natural	Tubular tipo U	0.779	2.103
6	GLP – Passagem	Natural	Tubular tipo U	0.779	2.103

Para todos os arranjos, o dimensionamento foi realizado utilizando a mesma localidade e os mesmos dados de consumo (Tabela 4).

Tabela 4: Dados de entrada comuns aos sistemas

Localidade	Cascavel – Paraná
Latitude, longitude e altitude	24.53°S; 53.33°O; 660 m
Inclinação do coletor	34.53 °
Azimute do coletor	0° N
Total de banhos por dia	5
Duração média de cada banho	10 min
Vazão do chuveiro/ducha	6 l/min
Demanda diária de água quente	300 litros
Temperatura da água de consumo	40°C
Temperatura de armazenamento da água	45°C

Nota: Os dados de radiação solar horizontal e de temperatura ambiente média para o município de Cascavel encontram-se no Apêndice A.

Observa-se, na Tabela 4, que o perfil de consumo adotado para o estudo corresponde a uma família de cinco pessoas com uma demanda estimada de 60 litros de água a 40°C por dia por pessoa. Esta configuração é típica de sistemas de pequeno porte e é muito recorrente no Brasil.

Além do dimensionamento, também foi realizado o balanço energético e a análise econômica dos sistemas. A análise econômica foi feita utilizando os parâmetros mostrados na Tabela 5. É importante observar que a utilização desses parâmetros está vinculada a característica de cada sistema analisado.

Tabela 5: Parâmetros econômicos

Taxa anual de juros	10 %
Tarifa de Energia Elétrica	0,40 R\$/kWh (B1 convencional)
Custo do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	3,20 R\$/Kg
Manutenção anual do sistema solar	2 % do custo inicial
Manutenção anual do sistema elétrico	2 % do custo inicial
Manutenção anual do sistema a gás	15 % do custo inicial
Custo de instalação	15 % do custo inicial

Nota: O custo de instalação inclui o gasto com mão de obra e com a rede hidráulica de água quente do sistema de aquecimento solar.

4.2.1 Resultados do dimensionamento

A Tabela 6 apresenta os resultados do dimensionamento do sistema solar e do sistema auxiliar para as configurações estudadas. As informações referentes ao sistema solar estão agrupadas segundo a metodologia de cálculo utilizada. O custo, a vida útil e a descrição dos equipamentos utilizados nesse estudo encontram-se no Apêndice B.

Tabela 6: Resultados do dimensionamento

Sistema	P_{AUX} (W)	V_{RT} (L)	NBR 15569		CARTA-F	
			N_C	A_{CT} (m ²)	N_C	A_{CT} (m ²)
1	7700	300	4	4	4	4
2	11300	300	4	4	4	4
3	1500	300	4	4	5	5
4	11300	300	4	4	4	4
5	7700	300	3	2,91	3	2,91
6	11300	300	3	2,91	2	1,94

Nota: P_{AUX} é a potência nominal do aquecedor auxiliar, V_{RT} é o volume do reservatório térmico, N_C é o número de coletores e A_{CT} é a área coletora total.

Observa-se, na Tabela 6, que os valores de potência do aquecedor auxiliar são equivalentes para as duas metodologias, pois o método de cálculo utilizado é o mesmo. Percebe-se, ainda, que as potências encontradas para os aquecedores

auxiliares a gás são maiores do que aquelas encontradas para os aquecedores elétricos. Isto se deve, primeiramente, ao rendimento do aquecedor a gás, que é inferior ao do aquecedor elétrico e, em segundo lugar, à ausência de aquecedores a gás de potências mais baixas no mercado. Para o sistema 3, que utiliza uma resistência elétrica no interior do reservatório térmico, o baixo valor encontrado se deve a forma de aquecimento utilizada (acumulação).

Ainda na Tabela 6 verifica-se que o volume do reservatório térmico selecionado para todos os casos foi de 300 litros. Este valor está de acordo com o sugerido pela NBR 15569, que diz que o volume de armazenamento deve corresponder no mínimo a 75% do volume diário de água quente consumido na edificação.

Com relação à área coletora total, nota-se que as duas metodologias apresentaram resultados semelhantes para os sistemas 1, 2 e 4 (4 m²). O mesmo ocorreu para o sistema 5 (2,91 m²). Para o sistema 3, entretanto, a Carta-F apresentou incremento de 1 coletor solar e para o sistema 6, redução de uma unidade. A explicação para isto está na otimização realizada pelo aplicativo (quando o dimensionamento é realizado pela Carta-F), que busca selecionar o sistema que apresenta o menor custo anual, incluindo os custos com equipamentos, instalação, manutenção e consumo de energia auxiliar (elétrica ou gás, conforme a configuração escolhida). Por fim, observa-se que os sistemas que empregam coletores planos apresentaram maior área coletora do que aqueles que utilizam coletores a vácuo. Isto ocorre devido à maior eficiência energética desses últimos.

4.2.2 Balanço energético

A Tabela 7 apresenta o balanço energético para cada sistema dimensionado. Observa-se que a demanda de energia anual é igual para todas as configurações, pois o consumo de água quente não se altera. Nota-se, também, que a fração solar encontrada para a metodologia da NBR 15569 esteve acima de 0,80. Vale lembrar que esta metodologia foi desenvolvida levando-se em consideração uma fração solar teórica de 70%, entretanto, quando se seleciona os equipamentos disponíveis no mercado é muito provável que a fração solar aumente. A mesma constatação foi observada por ATOÉ et al. (2012).

Tabela 7: Balanço energético dos sistemas dimensionados

Sistema	Q_T (kWh/ano)	NBR 15569			CARTA-F		
		F	Q_S (kWh/ano)	Q_{AUX} (kWh/ano)	F	Q_S (kWh/ano)	Q_{AUX} (kWh/ano)
1	3240,97	0,80	2578,63	560,22	0,80	2578,63	560,22
2	3240,97	0,80	2578,63	649,04	0,80	2578,63	649,04
3	3240,97	0,80	2578,63	697,20	0,85	2763,31	502,79
4	3240,97	0,80	2578,63	807,73	0,80	2578,63	807,73
5	3240,97	0,88	2864,35	318,55	0,88	2864,35	318,55
6	3240,97	0,88	2864,35	369,06	0,67	2172,18	1047,33

Nota: Q_T é a demanda anual de energia, F é a fração solar anual, Q_S é a produção de energia do sistema solar e Q_{AUX} é a produção de energia do aquecedor auxiliar.

Ainda na Tabela 7, verifica-se que os arranjos 3 e 4 apresentaram maior demanda por energia auxiliar para o método da NBR 15569. O motivo para isso está relacionado com a maior demanda de energia para manter a água quente no interior do reservatório térmico, pois enquanto nos sistemas de passagem a complementação é feita no momento de consumo e até a temperatura de 40°C, nos sistemas de acumulação a água deve ser mantida em torno de 45°C ao longo do dia. Para o método da Carta-F, observa-se uma redução na demanda por energia auxiliar e um aumento da produção de energia solar para o sistema 3. Isto se deve ao incremento de área coletora. Por fim, nota-se que as configurações que utilizam coletores a vácuo apresentaram as menores demandas por energia auxiliar. O sistema 6, entretanto, foi o que apresentou a maior demanda por energia auxiliar dentre os conjuntos analisados. Novamente, isto se deve ao fato do Solardim buscar o sistema com o menor custo anual.

4.2.3 Viabilidade econômica

Para a realização da avaliação econômica, os custos dos sistemas 1, 3 e 5 (SAS + Fonte auxiliar elétrica) foram comparados aos custos de um sistema de aquecimento de água estritamente elétrico, enquanto os custos dos sistemas 2, 4 e 6 (SAS + Fonte auxiliar a gás) foram comparados aos custos de um sistema de aquecimento de água estritamente a gás.

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados da viabilidade econômica dos sistemas dimensionados.

Tabela 8: Análise econômica para os sistemas dimensionados segundo a metodologia da NBR 15569

Sistema	C_I (R\$)	C_{IA} (R\$/ano)	C_{AM} (R\$/ano)	C_{EAUX} (R\$/ano)	C_{AT} (R\$/ano)	C_{ASC} (R\$/ano)	PBD (anos)	TIR (%)	Viabilidade econômica
1	3580,25	461,82	71,61	224,09	757,51	1098,32	6	22,61	Sim
2	3840,25	466,92	122,31	152,72	741,95	799,79	11	13,93	Sim
3	4280,25	517,39	85,61	278,88	881,87	1098,32	9	16,77	Sim
4	4530,25	547,97	136,11	190,06	874,14	799,79	22	9,48	Não
5	5733,05	763,63	114,66	127,42	1005,71	1098,32	11	12,62	Sim
6	5993,05	768,73	165,36	86,84	1020,93	799,79	---	5,11	Não

Nota: C_I é o custo inicial dos equipamentos, C_{IA} é o custo inicial anualizado, C_{AM} é o custo anual de manutenção, C_{EAUX} é o custo anual com energia auxiliar, C_{AT} é o custo anual total, C_{ASC} é o custo anual do sistema convencional, PBD é o tempo de retorno do investimento e TIR é a taxa interna de retorno. No Apêndice C encontra-se o resumo físico-financeiro de cada sistema dimensionado pelo método da NBR 15569.

Tabela 9: Análise econômica para os sistemas dimensionados segundo a metodologia da Carta-F

Sistema	C_I (R\$)	C_{IA} (R\$/ano)	C_{AM} (R\$/ano)	C_{EAUX} (R\$/ano)	C_{AT} (R\$/ano)	C_{ASC} (R\$/ano)	PBD (anos)	TIR (%)	Viabilidade econômica
1	3580,25	461,82	71,61	224,09	757,51	1098,32	6	22,61	Sim
2	3840,25	466,92	122,31	152,72	741,95	799,79	11	13,93	Sim
3	4746,00	572,10	94,92	201,12	868,13	1098,32	9	16,45	Sim
4	4530,25	547,97	136,11	190,06	874,14	799,79	22	9,48	Não
5	5733,05	763,63	114,66	127,42	1005,71	1098,32	11	12,62	Sim
6	4654,45	595,18	138,59	246,44	980,21	799,79	---	5,00	Não

Nota: No Apêndice D encontra-se o resumo físico-financeiro de cada sistema dimensionado pelo método da Carta-F.

Observa-se, nas Tabelas 8 e 9, que o sistema 1 foi o que apresentou o menor tempo de retorno (6 anos), seguido pelos sistemas 3, 2 e 5. Também é possível verificar que o sistema 3, dimensionado pelo método da Carta-F, apresentou ligeira redução no custo anual com energia auxiliar em comparação ao método da NBR 15569. Conforme dito anteriormente, a razão para isto está na otimização realizada pelo aplicativo. Já os sistemas 4 e 6, mesmo com a otimização feita para o método da Carta-F, não apresentaram viabilidade econômica (pois o tempo de retorno não existe ou é maior que a vida útil dos equipamentos). No caso do sistema 4, isto se deve basicamente a combinação do sistema de acumulação a gás com o uso de circulação forçada. Para o sistema 6, o principal motivo para a inviabilidade é o alto custo dos coletores a vácuo.

6. CONCLUSÕES

O aplicativo desenvolvido neste trabalho permite realizar de forma rápida e eficaz o dimensionamento e a análise econômica de sistemas solares de aquecimento de água de pequeno porte, utilizando metodologias de cálculo bastante consolidadas (Carta-F e NBR 15569). Também permite modificar a qualquer instante os parâmetros de entrada, possibilitando simular diferentes situações de utilização. Esta versatilidade possibilita ao usuário encontrar a melhor solução técnica-econômica sem recorrer ao uso de métodos de cálculo demorados. Ademais, a utilização do Solardim se mostra bastante simples, exigindo do utilizador não mais do que o conhecimento básico em energia solar.

Mediante a demonstração realizada foi possível verificar que a alteração dos componentes e da configuração do sistema de aquecimento solar, para a mesma demanda de energia, influencia fortemente a viabilidade econômica do projeto. A simples alteração do sistema auxiliar, por exemplo, pode tornar um investimento inviável economicamente. A mesma constatação pode ser estendida ao tipo do coletor solar e ao modo de circulação do sistema. Tomando-se, por exemplo, as simulações efetuadas neste trabalho, verificou-se que a partir dos parâmetros técnico-econômicos dos equipamentos dimensionados, o sistema com fonte auxiliar elétrica de passagem apresentou maior viabilidade econômica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Instalação predial de água fria: NBR 5626**. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação: NBR 15569**. Rio de Janeiro, 2008.

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. **Manual de capacitação em projetos de sistemas de aquecimento solar**. 138p. 2008.

ALVES, E. I. **Pequeno Atlas do Sistema Solar**. Imprensa da Universidade de Coimbra, 222p. 2010.

ATOÉ, L.; OLIVEIRA FILHO, D.; CARLO, J. C. Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 3, p. 75-87, 2012.

BORGES, T. P. F. **Síntese Otimizada de Sistemas de Aquecimento Solar de Água**. Campinas, SP, UNICAMP, 139p. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).

BUDIHardjo, I.; MORRISON, G. L. Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters. Sidney, Austrália. **Solar Energy**, v.83, p. 49-56. 2009.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. H. **Análise de Investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 11ª ed. São Paulo: Atlas, 432p. 2010.

COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. The average distribution of solar radiation – correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation. **Solar Energy**, v. 22, p. 155, 1979.

COMETA, E. **Energia Solar: utilização e empregos práticos**. 1ª ed. São Paulo: Hemus, 127p. 2004.

COMGÁS – Companhia de Gás de São Paulo. **Sistemas de Aquecimento de Água para Edifícios através da associação Energia Solar e Gás Natural**. 61p. 2011.

COSTA, H. A. F. P. **Modelação matemática de sistemas solares térmicos**. Vila Real, Portugal, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 100p. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Pesquisas de Fontes Alternativas e Energia. **CD-ROM - Atlas Solarimétrico do Brasil**, CRESESB, 2002.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar Princípios e Aplicações**; CEPEL, 28p. 2006.

DUFFIE, J. A. E; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 3rd ed. New York: J. Wiley. 908 p. 2006.

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

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 64p.

FERNANDES, C. A. O.; GUARONGHI, V. M. **Energia Solar**. 2007. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/esolar/esolar.html>>. Acesso em: 23 set. 2012.

IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná. **Médias históricas de temperatura do ar em estações do IAPAR**. Disponível em: < <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1070>>. Acesso em abr. de 2013.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 390p. 1983.

KLEIN, S. A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 19, p. 325 - 329, 1977.

LAFAY, J. M. S. **Análise energética de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás**. Porto Alegre, UFRGS. 173p. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).

LIANGDONG, M.; LU, Z.; ZHANG, J. LIANG, R. Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. Dalian, China. **Building and Environment**. v. 45, p. 1959-1967. 2010.

LIMA, J. B. A. **Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa TRNSYS**. São Paulo, USP. 123p. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).

LISBOA, P. A. **Programa de simulação de sistemas de aquecimento solar**. Rio de Janeiro, UERJ. 111p. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia. **Software SolTerm**. Disponível em: <<http://www.lneg.pt/iedt/projectos/370/>>. Acesso em jun. de 2013.

MANEA, T. F.; **Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo**. Porto Alegre, UFRGS. 75p. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

MANEA, T. F.; ROSA, F. N.; KRENZINGER, A. **Determinação de parâmetros de desempenho para coletores solares tubulares a vácuo**. LABSOL – Laboratório de energia solar – PROMEC – UFRGS. 2011.

NEWNAN, D.G.; LAVELLE, J.P.; ESCHENBACH, T.G. **Essentials of Engineering Economic Analysis**. 11^a ed. New York: Oxford University Press, 672p. 2011.

OLIVEIRA, F. K. S.; SARAIVA, M. F. O. **O Sol: a nossa estrela**. Porto Alegre: Departamento de Astronomia do Instituto de Física da UFRGS, 2013. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>>. Acesso em ago. 2013.

PAGLIARO, M.; PALMISANO, G.; CIRIMINNA, R. **Flexible Solar Cells**. John Wiley, New York, 190p. 2008.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. Ed. São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, v. 1, p. 60, 2006.

PIDWIRNY, M. **Atmospheric Effects on Incoming Solar Radiation**. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition, 2006.

POZZEBON, F. B. **Aperfeiçoamento de um programa de simulação computacional para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água por energia solar**. Porto Alegre, UFRGS. 134p. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

PRADO, R. T. A.; ARRUDA, L. B.; FILHO, A. M. B.; TABORIANSKI, V. M.; KAWAKITA, C. Y. ARANTES, L. O. **Levantamento do estado da arte: Energia Solar**. São Paulo, 60p. 2007.

RETScreen International, homepage. Disponível em: <<http://www.retscreen.net>>. Acesso em jun. de 2013.

ROSA, F. N. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. Porto Alegre, UFRG. 65p. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

SHUKLA, R.; SUMATHY, K.; ERICKSON, P.; GONG, J. Recent advances in the solar water heating systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 173-190. 2013.

SILVA, A. V. R. **Nossa estrela: o Sol**. 1^a ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 166p. 2006.

SIQUEIRA, A. M. O. **Desenvolvimento de um Programa de Simulação Computacional de Sistemas de Aquecimento Solar para Água**. Porto Alegre, UFRGS. 147p. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).

SOUZA, A. G. L.; **Desenvolvimento de software para projeto de sistemas centralizados de aquecimento solar de água**. Rio de Janeiro, UERJ. 131p. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. **Quím. Nova**, São Paulo, v.32, n.3, p.757-767, 2009.

VIENELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, 1991. p.133-200.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Radiação solar horizontal e temperatura ambiente média para o município de Cascavel - Paraná

Tabela A.1 - Radiação solar horizontal média diária mensal

Mês	Radiação solar horizontal média diária mensal (kWh.m ⁻² .dia ⁻¹)
JAN	5,67
FEV	5,83
MAR	5,25
ABR	4,58
MAI	3,81
JUN	3,11
JUL	3,61
AGO	3,92
SET	4,14
OUT	5,44
NOV	5,86
DEZ	6,39

Fonte: CRESESB, 2002.

Tabela A.2 - Temperatura ambiente média mensal

Mês	Temperatura ambiente média mensal (°C)
JAN	23,1
FEV	22,7
MAR	22,2
ABR	19,9
MAI	17,0
JUN	15,1
JUL	15,2
AGO	16,7
SET	18,0
OUT	20,3
NOV	21,8
DEZ	22,8

Fonte: IAPAR, 2013.

APÊNDICE B – Componentes dos sistemas dimensionados

Tabela B.1 - Componentes do sistema 1

Coletor solar	Marca/Modelo: COLSOL - PL100RE
	Área de captação: 1.00 m ²
	Custo: 405.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Reservatório térmico	Marca/Modelo: CUMULUS - VITREX BP 300
	Volume: 300 litros
	Custo: 1415.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Aquecedor auxiliar	Marca/Modelo: LORENZETTI - DUCHA ELETRÔNICA
	Potência: 7700 W
	Custo: 90.00 R\$
	Vida útil: 2 anos

Tabela B.2 - Componentes do sistema 2

Coletor solar	Marca/Modelo: COLSOL - PL100RE
	Área de captação: 1.00 m ²
	Custo: 405.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Reservatório térmico	Marca/Modelo: CUMULUS - VITREX BP 300
	Volume: 300 litros
	Custo: 1415.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Aquecedor auxiliar	Marca/Modelo: KOMECO - KO 07 M 1BNLP1
	Potência: 11300 W
	Custo: 350.00 R\$
	Vida útil: 10 anos

Tabela B.3 - Componentes do sistema 3

Coletor solar	Marca/Modelo: COLSOL - PL100RE
	Área de captação: 1.00 m ²
	Custo: 405.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Reservatório térmico	Marca/Modelo: CUMULUS - VITREX BP 300
	Volume: 300 litros
	Custo: 1415.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Aquecedor auxiliar	Marca/Modelo: Resistência Elétrica 220V
	Potência: 1500 W
	Custo: 100.00 R\$
	Vida útil: 5 anos

Tabela B.4 - Componentes do sistema 4

Coletor solar	Marca/Modelo: COLSOL - PL100RE
	Área de captação: 1.00 m ²
	Custo: 405.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Reservatório térmico	Marca/Modelo: CUMULUS - VITREX BP 300
	Volume: 300 litros
	Custo: 1415.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Aquecedor auxiliar	Marca/Modelo: KOMECO - KO 07 M 1BNLP1
	Potência: 11300 W
	Custo: 350.00 R\$
	Vida útil: 10 anos

Tabela B.5 - Componentes do sistema 5

Coletor solar	Marca/Modelo: HIMIN - HUI12/1.8
	Área de captação: 0.97 m ²
	Custo: 1164.00 R\$
	Vida útil: 15 anos
Reservatório térmico	Marca/Modelo: CUMULUS - VITREX BP 300
	Volume: 300 litros
	Custo: 1415.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Aquecedor auxiliar	Marca/Modelo: LORENZETTI - DUCHA ELETRÔNICA
	Potência: 7700 W
	Custo: 90.00 R\$
	Vida útil: 2 anos

Tabela B.6 - Componentes do sistema 6

Coletor solar	Marca/Modelo: HIMIN - HUI12/1.8
	Área de captação: 0.97 m ²
	Custo: 1164.00 R\$
	Vida útil: 15 anos
Reservatório térmico	Marca/Modelo: CUMULUS - VITREX BP 300
	Volume: 300 litros
	Custo: 1415.00 R\$
	Vida útil: 20 anos
Aquecedor auxiliar	Marca/Modelo: KOMECO - KO 07 M 1BNLP1
	Potência: 11300 W
	Custo: 350.00 R\$
	Vida útil: 10 anos

APÊNDICE C – Resumo físico-financeiro dos sistemas dimensionados pelo método da NBR 15569

Tabela C.1 - Resumo físico-financeiro do Sistema 1

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	4	405.00	1620.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	90.00	90.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	455.25
Custo inicial (R\$)	---	---	3580.25

Tabela C.2 - Resumo físico-financeiro do Sistema 2

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	4	405.00	1620.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	350.00	350.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	455.25
Custo inicial (R\$)	---	---	3840.25

Tabela C.3 - Resumo físico-financeiro do Sistema 3

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	4	405.00	1620.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	100.00	100.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	545.25
Motobomba + controlador*	---	---	600.00
Custo inicial (R\$)	---	---	4280.25

*Preço médio do kit que inclui bomba hidráulica e controlador diferencial de temperatura.

Tabela C.4 - Resumo físico-financeiro do Sistema 4

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	4	405.00	1620.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	350.00	350.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	545.25
Motobomba + controlador*	---	---	600.00
Custo inicial (R\$)	---	---	4530.25

*Preço médio do kit que inclui bomba hidráulica e controlador diferencial de temperatura.

Tabela C.5 - Resumo físico-financeiro do Sistema 5

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	3	1164.00	3492.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	90.00	90.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	736.05
Custo inicial (R\$)	---	---	5733.05

Tabela C.6 - Resumo físico-financeiro do Sistema 6

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	3	1164.00	3492.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	350.00	350.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	736.05
Custo inicial (R\$)	---	---	5993.05

APÊNDICE D – Resumo físico-financeiro dos sistemas dimensionados pelo método da Carta-F

Tabela D.1 - Resumo físico-financeiro do Sistema 1

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	4	405.00	1620.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	90.00	90.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	455.25
Custo inicial (R\$)	---	---	3580.25

Tabela D.2 - Resumo físico-financeiro do Sistema 2

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	4	405.00	1620.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	350.00	350.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	455.25
Custo inicial (R\$)	---	---	3840.25

Tabela D.3 - Resumo físico-financeiro do Sistema 3

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	5	405.00	2025.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	100.00	100.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	606.00
Motobomba + controlador*	---	---	600.00
Custo inicial (R\$)	---	---	4746.00

*Preço médio do kit que inclui bomba hidráulica e controlador diferencial de temperatura.

Tabela D.4 - Resumo físico-financeiro do Sistema 4

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	4	405.00	1620.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	350.00	350.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	545.25
Motobomba + controlador*	---	---	600.00
Custo inicial (R\$)	---	---	4530.25

*Preço médio do kit que inclui bomba hidráulica e controlador diferencial de temperatura.

Tabela D.5 - Resumo físico-financeiro do Sistema 5

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	3	1164.00	3492.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	90.00	90.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	736.05
Custo inicial (R\$)	---	---	5733.05

Tabela D.6 - Resumo físico-financeiro do Sistema 6

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Coletores solares	3	1164.00	2328.00
Reservatório térmico	1	1415.00	1415.00
Aquecedor auxiliar	1	350.00	350.00
Rede hidráulica + instalação	---	---	561.45
Custo inicial (R\$)	---	---	4654.45