

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JULIANA EMANUELLA GONÇALVES

**ANÁLISE DE SISTEMAS SOLARES ASSISTIDOS POR BOMBA DE CALOR
DIRECIONADOS A AQUECIMENTO DOMÉSTICO DE ÁGUA**

Florianópolis

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

JULIANA EMANUELLA GONÇALVES

**ANÁLISE DE SISTEMAS SOLARES ASSISTIDOS POR BOMBA DE CALOR
DIRECIONADOS A AQUECIMENTO DOMÉSTICO DE ÁGUA**

Projeto de Dissertação de Mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção da Qualificação.

ORIENTADOR: SERGIO COLLE

Florianópolis

2014

NOTA AOS AVALIADORES

Por meio desta nota, espera-se esclarecer alguns aspectos relativos ao cronograma a ser adotado, bem como a decisões tomadas a respeito deste texto.

Os resultados obtidos pela autora no decorrer do Trabalho de Curso e do Estágio Obrigatório, ambos realizados no Laboratório de Energia Solar, sob orientação do Professor Sergio Colle, justificam a sequência das atividades na forma da Dissertação de Mestrado.

No âmbito do programa recém-adotado pelo POSMEC, o qual incentiva os alunos de graduação a cursar as disciplinas da Pós-Graduação, grande parte das disciplinas do Programa foi cursada e permitiram a entrega do Projeto de Dissertação antes do prazo estabelecido.

Uma vez que o texto do Trabalho de Curso pode ser tomado como o Projeto de Dissertação, pois cumpre os requisitos necessários, nestes primeiros meses do Programa (desde Agosto de 2014), todos os esforços foram concentrados em iniciar o texto da Dissertação tal como será entregue. Deste modo, os capítulos de Introdução e Revisão Bibliográfica aqui apresentados equivalem aos capítulos homônimos do Trabalho de Curso da autora, tendo sido devidamente revisados e atualizados. Assim, o presente texto será incorporado integralmente ao texto da Dissertação e por este motivo ultrapassa o número de páginas recomendado pelo Programa.

Tendo-se em vista que todos os créditos requeridos em disciplinas já foram cursados e que parte do texto da Dissertação foi elaborado, pretende-se concluir o Programa em no máximo 12 meses.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
1.1. OBJETIVO GERAL	9
1.1.1. Objetivos específicos	10
1.2. CONTRIBUIÇÕES	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. SISTEMA SOLAR CONVENCIONAL PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	12
2.2. SISTEMAS SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA ASSISTIDOS POR BOMBAS DE CALOR	17
2.3. PERFIL DE CONSUMO	23
3. METODOLOGIA.....	29
4. DESCRIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES.....	30
REFERÊNCIAS	35

1. INTRODUÇÃO

A crise energética de 2001, associada à preocupação com questões climáticas e ambientais, pressionou o governo brasileiro e as empresas do ramo energético a investir e a incentivar o investimento no desenvolvimento de tecnologias que utilizem fontes de energia renovável, bem como em tecnologias mais eficientes de conversão. A partir daí, políticas energéticas surgiram com o propósito de estimular o uso de sistemas solares de aquecimento doméstico de água a fim de reduzir o consumo total de energia e deslocar o pico de consumo do horário de ponta.

Entretanto, os tímidos investimentos no setor energético frente às crises de energia podem não ser suficientes para garantir o fornecimento desse insumo para a crescente demanda brasileira nos próximos anos. Segundo reportagem publicada no Portal do Jornal Nacional em março deste ano, desde o final de 2013, os níveis de água dos reservatórios das hidrelétricas nas regiões Sudeste e Centro-Oeste têm diminuído e já chegam às mesmas condições em que estavam quando do apagão de 2001: 34% em fevereiro deste ano comparado ao nível de 33% de fevereiro de 2001.

Ainda, segundo o Boletim Semanal de Operação divulgado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), na semana do dia 07 a 13 de junho deste ano, a geração de energia elétrica pelas usinas termoeletricas foi de aproximadamente 16 GW, superando o total de capacidade instalada da Usina Itaipu de 14 GW (MME, 2013). Sendo que, neste mesmo período, as hidrelétricas foram responsáveis pela geração de pouco mais de 40 GW elétricos. A conta é simples: de toda a energia elétrica gerada nesta semana em particular, cerca de 30% vieram da queima de combustíveis em usinas termoeletricas. Este cenário vem se repetindo semana após semana desde o início do ano, enquanto os níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas localizados no Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste continuam próximos a 30%, segundo dados disponibilizados pela ONS em seu Portal Online.

A matriz energética brasileira depende fortemente do potencial hidráulico do país e da utilização de derivados do petróleo e de biocombustíveis. É a limitação do fornecimento de energia pela dependência de ciclos hidrológicos favoráveis que resulta em crises de abastecimento, com interrupções no fornecimento e casos de apagões. Proclamar à população que

seja feito uso racional dos recursos, tampouco políticas de racionamento forçado serão suficientes. É necessário que sejam tomadas medidas estruturais e de longo prazo, como a diversificação da matriz energética, descentralização da geração de energia e melhora da eficiência dos equipamentos e sistemas movidos à energia elétrica.

Neste cenário, segundo o Relatório Final do Balanço Energético Nacional (MME, 2013), o setor residencial foi responsável por 23,6% do consumo de eletricidade em 2012, ficando atrás apenas do setor industrial (42,1%). Os setores comercial e público correspondem aos terceiro e quarto maiores consumidores de energia elétrica, com 16% e 8% do consumo, respectivamente. Ainda, de toda a energia consumida pelo setor residencial, 46% foi energia elétrica, seguida pelo consumo de lenha e gás liquefeito de petróleo (GLP), ambos com parcelas de 27%.

Além disso, nesta edição, o Relatório ainda traz uma análise inédita intitulada Balanço de Energia Útil (BEU, Anexo IV), na qual foram avaliados o rendimento energético global da sociedade brasileira e os rendimentos específicos de cada setor de atividade (MME, 2013). Entre os principais setores de atividade, o consumo do setor residencial aparece entre os menos eficientes, com um rendimento estimado de 47,4% contra 75,2% e 72% dos setores Energético e Industrial, respectivamente, ficando à frente apenas do setor de Transportes (37,5%).

Na análise em questão, foram considerados separadamente dois fatores de impacto no rendimento de cada setor: evolução da tecnologia e evolução da sociedade. Para avaliar os efeitos da sociedade, foram considerados os valores de energia final referentes aos anos de 1984, 1994 e 2004, caracterizando o contexto da sociedade, porém com os rendimentos referentes ao ano de 2004, que representam a evolução da tecnologia. Já para avaliar apenas os efeitos da tecnologia, considerou-se como dados de entrada os valores de energia final referentes a 2004, porém com os rendimentos de 1984, 1994 e 2004. Aqui, entende-se por energia final a quantidade de energia útil consumida mais as perdas inerentes à transformação dos insumos.

Foi verificado que entre 1984 e 2004 o segmento residencial foi especialmente afetado pela evolução da sociedade. Segundo o documento, essa variação se deve ao processo de substituição dos fogões a lenha ocorrido no decorrer daquele período. Desta análise, é possível concluir que, mesmo que haja tecnologias mais eficientes disponíveis no mercado, elas devem ser

absorvidas pela sociedade para que seu impacto seja materializado, como foi o caso da substituição dos fogões a lenha.

Neste contexto, a fim de caracterizar a sociedade brasileira, no período de 2004 a 2006, no âmbito do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2008), a Eletrobrás realizou uma pesquisa de campo mediante aplicação de questionários, com o objetivo de obter dados sobre a posse de equipamentos elétricos e hábitos de uso dos consumidores da classe residencial. Os dados colhidos mostram que, do total de energia elétrica consumida em uma residência, 24% são consumidos pela operação do chuveiro elétrico, perdendo apenas para o consumo de refrigeradores.

A pesquisa da PROCEL mostrou, inclusive, que 73,5% dos sistemas de aquecimento de água utilizavam energia elétrica como fonte de aquecimento, 5,9% utilizavam gás e apenas 0,4% usavam aquecimento solar. Convém destacar que, dos sistemas que usavam energia elétrica como fonte de aquecimento, o chuveiro elétrico respondeu pela quase totalidade, com a parcela de 99,6%.

Além de converter energia elétrica em uma forma menos nobre de energia – o calor –, os chuveiros elétricos ainda são responsáveis pelo pico de consumo de energia que ocorre entre as 18h e 21h (PROCEL, 2008). Conseqüentemente, toda a malha da rede elétrica brasileira deve ser superdimensionada para atender à demanda de pico. Nos períodos em que o pico de consumo ocorre, a rede elétrica e todos os equipamentos que dela participam ficam sobrecarregados, elevando os riscos de falhas no fornecimento.

Outro setor que merece atenção no que concerne ao consumo de energia para aquecimento de água é o setor hoteleiro. Segundo dados da Federação Brasileira de Hospedagem e Alimentação (FBHA), os gastos do setor hoteleiro e de alimentação com energia elétrica chegam a 15% do total dos gastos, atrás apenas dos custos de mão de obra (20 a 25%). Ainda, conforme o Departamento Nacional de Aquecimento Solar (DASOL) da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), o aquecimento de água em empreendimentos hoteleiros corresponde por cerca de 20% do consumo de energia elétrica e de até 40% do consumo global de recursos energéticos.

Passos (2011) demonstrou a viabilidade técnica e econômica da introdução de sistemas solares para aquecimento doméstico de água no Brasil. Inclusive, para uma das configurações, o autor adotou uma estratégia de controle do sistema que possibilitou a supressão total do pico de

demanda. Por meio de uma análise econômica, foram estimados os impactos econômicos tanto para o consumidor quanto para a concessionária de energia. Com base em diferentes cenários de tarifação de energia elétrica e subsídios ao equipamento solar, foi possível afirmar a viabilidade econômica da introdução do sistema de aquecimento solar para consumidores de todas as regiões do país. Para o setor elétrico, os resultados apontam uma economia de pelo menos R\$ 560 por cada chuveiro que não seja instalado (PASSOS, 2011).

Foi também em um cenário de crise energética que as bombas de calor passaram a ser utilizadas para fins de condicionamento de ar e aquecimento de água. Nos anos 1970, a segunda crise do petróleo mudou o foco das pesquisas em energia, os esforços foram concentrados em meios de conversão de energia que utilizassem fontes de energia alternativas (KARA *et al.*, 2008). Com o aumento do investimento no desenvolvimento de bombas de calor, as dificuldades técnicas encontradas anteriormente foram superadas e a tecnologia foi consolidada. Neste contexto, foram propostos os primeiros sistemas solares combinados com bombas de calor (PIETSCH *apud* HEPBASLI; KALINCI, 2009).

Freeman *et al.* (1979) vislumbraram a possibilidade de combinar coletores solares e bombas de calor, duas tecnologias já promissoras à época, a fim de minimizar as desvantagens da operação individual de cada uma e proporcionar um sistema de condicionamento de água ou ar ambiente que consumisse menos recursos não renováveis e menos energia auxiliar. Estudos anteriores ao trabalho de Freeman *et al.* mostraram, em geral, que economias substanciais de energia podem ser obtidas ao se empregar os sistemas combinados. Contudo, em alguns casos a redução de consumo de energia não se refletiu em redução do custo total do investimento (FREEMAN *et al.*, 1979).

É possível estabelecer diversas configurações segundo o posicionamento da bomba de calor em um sistema solar convencional para aquecimento de água, decisão que impacta diretamente o desempenho do sistema. Dentre outros parâmetros, destaca-se a influência da localização geográfica da instalação, que condiciona a operação do coletor solar e, eventualmente, da própria bomba de calor. Em seguida, é ainda necessário determinar a capacidade de aquecimento da bomba de calor mais adequada (STERLING; COLLINS, 2012). Todas estas questões não são triviais. Destaca-se, deste modo, a importância do trabalho computacional no sentido de simular e avaliar diferentes configurações, com o propósito de determinar o dimensionamento térmico e econômico ótimo para cada uma delas.

Isto posto, considera-se que sistemas solares de aquecimento de água assistidos por bombas de calor podem ser promissores no cenário energético brasileiro, visto que correspondem ao apelo pelo emprego de energias renováveis, por valer-se de energia solar, e satisfazem a necessidade de utilização mais eficiente dos recursos, devido à utilização mais eficiente de energia elétrica feita pela bomba de calor.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver plataformas de simulação transiente direcionadas à análise do comportamento térmico de sistemas de aquecimento de água. Em especial, serão estruturadas plataformas de simulação para sistemas solares combinados com bomba de calor.

Pretende-se dimensionar o sistema para atender à demanda por água quente de condomínios residenciais e/ou hotéis, que configuram empreendimentos de grande porte e que permitem, portanto, maior investimento inicial. Assim, espera-se que o custo inicial do sistema seja dividido entre o total de apartamentos, tornando o projeto mais atrativo, visto que o custo de uma bomba de calor, além do custo dos coletores, pode ser proibitivo para o caso de aplicações residenciais individuais.

Além de condomínios residenciais e hotéis, ainda é possível imaginar a aplicação de sistemas solares assistidos por bombas de calor para atender à demanda de aquecimento de hospitais e clínicas de internamento, já que estes demandam igualmente grandes quantidades de água quente para atender às necessidades de alojamento, lavanderia e cozinha, por exemplo.

A análise será conduzida para avaliar o desempenho do sistema em aplicações residenciais, por meio da utilização de um perfil estatístico de consumo obtido através de medições durante um estudo de prospecção em campo (SALAZAR, 2004), aliado a um consumo diário de água a 40 °C coerente com o consumo total de uma edificação de grande porte (seja um condomínio residencial, hotel ou hospital). Serão utilizados os dados climatológicos para a cidade de Florianópolis-SC.

1.1.1. Objetivos específicos

A partir do objetivo geral do trabalho, é possível pontuar objetivos específicos, que devem ser alcançados no decorrer do andamento do trabalho:

- a partir da literatura, realizar o levantamento de estudos consistentes e relevantes ao tema da pesquisa; prospectar configurações já estudadas de sistemas solares e sistemas solares combinados com bombas de calor para aquecimento de água;
- estabelecer uma configuração adequada para o sistema solar conjugado à bomba de calor com base na pesquisa bibliográfica;
- desenvolver as plataformas de simulação para o sistema solar conjugado à bomba de calor, bem como para os sistemas solares convencionais de aquecimento de água;
- analisar a influência de diferentes parâmetros de dimensionamento no comportamento dos sistemas;
- analisar a influência do perfil de consumo de água quente no comportamento do sistema;
- comparar o desempenho térmico do sistema conjugado à bomba de calor com os sistemas solares convencionais de aquecimento de água;
- estimar o custo de operação do sistema conjugado à bomba de calor e compará-lo com os custos de operação dos sistemas convencionais de aquecimento de água (convencional solar, elétrico e a gás);
- realizar a otimização das configurações segundo o critério do ganho líquido no ciclo de vida do empreendimento, procurando-se determinar uma configuração que retorne ao usuário a melhor relação custo-benefício no decorrer de sua vida útil.

1.2. CONTRIBUIÇÕES

Primeiramente, tendo em vista a baixa aceitabilidade de sistemas solares no Brasil, espera-se que o presente trabalho contribua para a promoção da tecnologia, buscando evidenciar

a possível vantagem destes sistemas em relação aos convencionais para aquecimento de água em termos de ganho líquido no ciclo de vida do empreendimento.

Embora este estudo tenha por finalidade investigar o desempenho de sistemas para uma localização geográfica em particular (Florianópolis-SC), esta condição não será absoluta. Pretende-se construir plataformas de simulação para os sistemas que permitam a alteração dos parâmetros e das especificações técnicas de forma flexível e eficiente. Assim, ao alterar os dados de entrada, espera-se estender as análises para diferentes localidades do país. Ainda, A flexibilidade das plataformas de simulação permite diversas outras modificações que poderão ser testadas e analisadas no decorrer deste trabalho ou em trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica aqui apresentada é fruto do trabalho realizado no decorrer do Trabalho de Curso da autora, tendo sido revisada e atualizada, e se tornará, integralmente, o capítulo homônimo do texto de Dissertação de Mestrado.

2.1. SISTEMA SOLAR CONVENCIONAL PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA

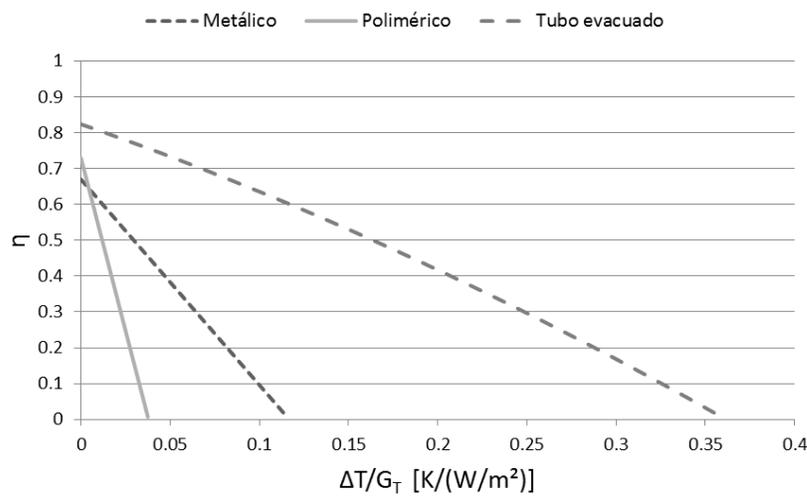
Essencialmente, sistemas solares para aquecimento de água são compostos pelos seguintes elementos básicos: coletor solar, reservatório térmico e alguma fonte de energia auxiliar. O coletor solar é, sem dúvida, o principal dentre os três, sendo o responsável por absorver a radiação solar e transferi-la para o fluido de trabalho ou diretamente para a água de consumo, se for o caso.

Os coletores mais utilizados para aquecimento doméstico de água são os coletores planos e coletores tubo-evacuados. Nos coletores tubo-evacuados, o isolamento é realizado por meio de vácuo entre os tubos interno e externo, o que atenua as perdas térmicas por condução e convecção e torna-os mais eficientes (ROSA, 2012). Entretanto, essa estrutura mais complexa e robusta com relação às perdas reflete em maior preço, se comparada aos coletores planos. Em outra categoria ainda se encontram os coletores concentradores, cujas aplicações se dirigem a níveis mais elevados de temperatura.

Para ilustrar, a Figura 1 compara as curvas de eficiência de dois coletores planos (um coletor metálico com cobertura e um coletor polimérico sem cobertura) e um coletor tubo a vácuo. Percebe-se que todas as curvas possuem valores próximos para o coeficiente linear, o qual representa a proporção do ganho do coletor com relação à radiação incidente. Por outro lado, as perdas de um coletor são reproduzidas graficamente pelo coeficiente angular da curva. Neste sentido, pode-se dizer que, em geral, para mesma variação de temperatura e mesmo valor de radiação solar, o coletor plano polimérico tem desempenho inferior ao coletor plano metálico, e que ambos os coletores planos são menos eficientes que o coletor tubo-evacuado.

Sendo o Brasil um país de condições climáticas predominantemente amenas, geralmente os coletores de placa plana são mais adequados aos níveis de temperatura exigidos em projetos de aquecimento de água residencial, além de diminuir o investimento inicial sem perder significativamente em eficiência.

Figura 1 – Curva de eficiência para dois coletores planos (metálico e polimérico) e um coletor tubo a vácuo.

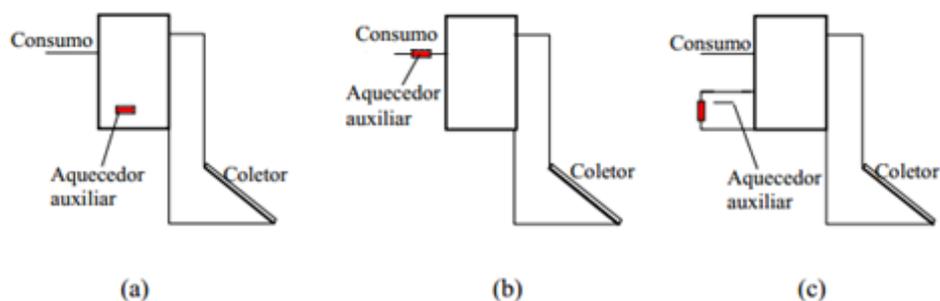


O reservatório térmico é especialmente importante quando há defasagem entre os períodos de consumo e de disponibilidade de radiação solar. Costuma-se associar o volume do reservatório com a área de coletores utilizada, o que é bastante adequado para fins de otimização. Na literatura é recomendado investir de 50 a 100 litros em volume de armazenamento de energia a cada metro quadrado coberto por coletores (DUFFIE; BECKMAN, 2006; WEISS, 2003). Outro aspecto que deve ser considerado é o efeito da estratificação térmica que ocorre devido à diferença de temperatura ao longo da altura do reservatório. Recomenda-se utilizar equipamentos na vertical e configurar entradas e saídas de fluido do reservatório de modo a promover este efeito (KLEIN; ALVARADO, 2010).

Com relação à fonte de energia auxiliar, o tipo de energia a ser empregado varia conforme a disponibilidade e o preço das fontes de energia locais. No Brasil, onde a energia elétrica é tradicionalmente barata com relação às demais e com relação às tarifas vigentes em outros países, comumente se utiliza uma resistência elétrica. Entretanto, alternativas possíveis são aquecedores a gás ou a óleo (DUFFIE; BECKMAN, 2006). A Figura 2 mostra esquematicamente

diferentes configurações de projeto para a instalação do aquecedor auxiliar, quais sejam: a) internamente ao reservatório, b) externamente em série ao reservatório e c) externamente em paralelo ao reservatório.

Figura 2 – Esquema das alternativas para posicionamento do aquecedor auxiliar: a) aquecedor auxiliar interno ao reservatório, b) aquecedor auxiliar externo e em série ao reservatório (aquecedor de passagem) e c) aquecedor auxiliar externo e em paralelo ao reservatório (LAFAY, 2005).



Estes três dispositivos principais descritos anteriormente podem ser arranjados de maneiras diferentes, conforme as especificações de projeto, para compor o sistema de aquecimento. A Figura 3 mostra algumas destas possíveis configurações. Com relação à forma de circulação do fluido no coletor solar, destacam-se dois modos diferentes de operação: convecção natural, configurando um sistema passivo, também conhecido como termossifão; ou por convecção forçada, sendo o sistema, neste caso, classificado como sistema ativo.

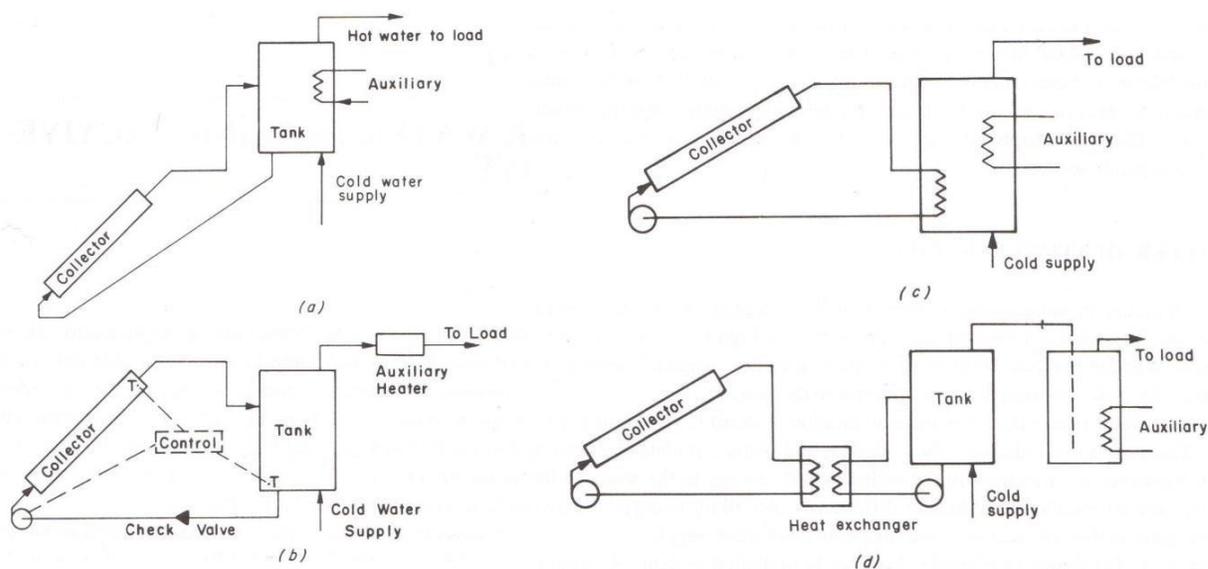
Nos sistemas passivos, o fluido circula entre o coletor solar e o reservatório pela combinação dos efeitos da gravidade e de variação de densidade. Por este motivo, o reservatório deve ser posicionado acima dos coletores solares, para que o fluido frio, com maior densidade, escoe para a entrada do coletor solar e absorva energia solar, com conseqüente aumento de temperatura. Então, com menor densidade, o fluido é capaz de retornar ao reservatório e completar o circuito. A Figura 8a ilustra um sistema passivo para aquecimento de água. Devido a maior simplicidade de funcionamento e disponibilidade razoável de radiação solar em praticamente todo o território brasileiro, o sistema passivo é o mais utilizado no Brasil (POZZEBON, 2007).

Quando se utiliza uma bomba hidráulica para criar o gradiente de pressão capaz de circular o fluido pelo coletor solar, não há restrição quanto ao posicionamento do reservatório, pois as barreiras ao escoamento do fluido serão transpostas pelo fluxo imposto pela bomba

hidráulica. Contudo, neste caso, a circulação do fluido depende do acionamento da bomba, que deve ser feito por meio de um dispositivo capaz de controlar o fluxo conforme parâmetros pré-estabelecidos. Para os sistemas convencionais de aquecimento solar de água, é suficiente a utilização de um controlador diferencial por meio da medição da temperatura no fundo do reservatório, ou seja, a temperatura aproximada do fluido entrando no coletor solar, e da temperatura na saída do coletor solar. Por conseguinte, quando este diferencial de temperatura torna-se menor que o estabelecido ou quando a temperatura do reservatório atingir uma temperatura desejada, a bomba é então desligada.

Visto que é necessário utilizar dispositivos adicionais no caso dos sistemas ativos, os custos relacionados aumentam em comparação aos sistemas passivos. Entretanto, apesar de mais complexos e mais caros, estes sistemas permitem maior flexibilidade com relação ao posicionamento dos coletores e do reservatório térmico.

Figura 3 – Possíveis configurações de montagem para sistemas solares de aquecimento de água: a) sistema solar em termosifão, b) sistema solar com reservatório único e circulação forçada, c) sistema solar com circuito anti-congelamento do fluido do coletor solar e trocador de calor interno ao reservatório e d) sistema solar com circuito anti-congelamento do fluido do coletor solar e trocador de calor externo ao reservatório (DUFFIE; BECKMAN, 2006).



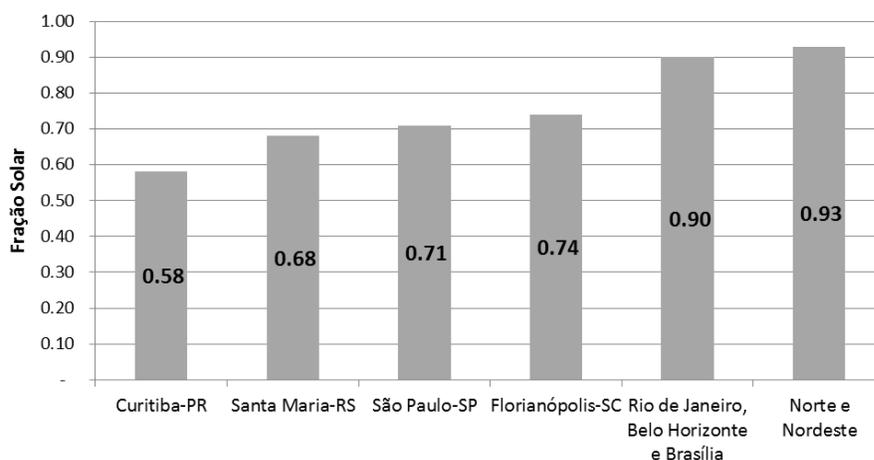
No Brasil, poucos estudos consistentes foram realizados no sentido de avaliar o comportamento de sistemas térmicos para aquecimento doméstico de água através de energia

solar. Contudo, um estudo que se destaca como referência na avaliação do impacto de sistemas solares em residências brasileiras foi conduzido por Passos (2011). O autor analisou o desempenho de quatro diferentes configurações de sistemas solares por convecção natural para 19 cidades brasileiras distribuídas em todo o território brasileiro. Em suma, os casos estudados foram:

- Caso 01, similar à configuração da Figura 2a e Figura 3a, onde a resistência elétrica é instalada internamente ao reservatório;
- Caso 02, na qual um aquecedor de passagem é empregado no exterior do reservatório, operando em série com o mesmo, de modo a fornecer apenas a quantidade necessária de energia para que a temperatura de consumo seja alcançada (caso da Figura 2b);
- Caso 03, sistema solar com dois reservatórios em série e resistência interna apenas no segundo;
- Caso 04, mesma configuração do caso 03, porém com restrição do acionamento da resistência apenas entre 0h e 6h.

De acordo com os resultados obtidos, dentre os sistemas estudados por Passos (2011), o sistema com o aquecedor de passagem se mostrou a configuração mais adequada para a maioria das cidades brasileiras contempladas no estudo, inclusive para Florianópolis-SC. Um indicador de desempenho geralmente utilizado para avaliar sistemas solares é a fração solar, que quantifica a parcela da demanda por energia que é fornecida pelo aquecimento solar (Figura 4).

Figura 4 – Resultados em termos de fração solar obtidos por Passos (2011).



Para as cidades analisadas pelo autor, o valor mais baixo foi verificado para Curitiba-PR, 0,58, em seguida, as localidades de Santa Maria, no interior do Rio Grande do Sul, São Paulo e Florianópolis obtiveram frações solares anuais de 0,68, 0,71 e 0,74. Nas cidades do Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília, a fração solar anual ficou em torno de 0,90. Já as cidades situadas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, apresentaram uma fração solar anual superior a 0,93. Além disso, verificou-se reduções do pico de consumo de pelo menos 85% (região Sul) a um máximo de 95% nas regiões Norte e Nordeste.

2.2. SISTEMAS SOLARES PARA AQUECIMENTO DE ÁGUA ASSISTIDOS POR BOMBAS DE CALOR

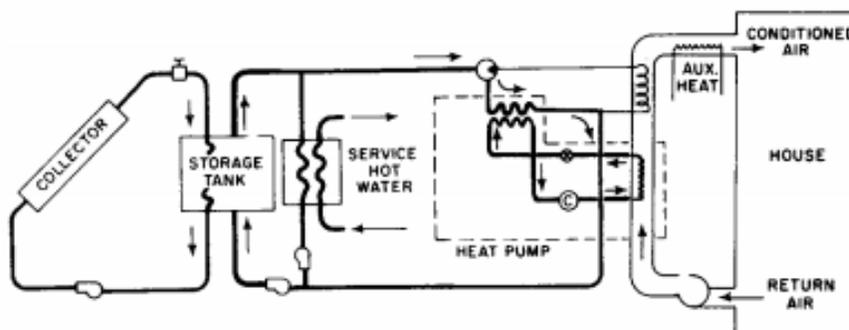
Assim como é possível estabelecer inúmeras configurações para sistemas solares convencionais de aquecimento de água, também o é para sistemas solares para aquecimento de água assistidos por bombas de calor (STERLING; COLLINS, 2012). Na prática, para sistemas solares combinados com bombas de calor, foi verificado que geralmente a bomba de calor é utilizada como fonte de energia auxiliar ou de *backup* (AHMAD *et al.*, 2013; PARANAS *et al.*, 2013) ou então em sistemas de expansão direta (CHATURVEDI *et al.*, 1998; CHYNG *et al.*, 2003; KUANG *et al.*, 2003; HUANG *et al.*, 2005). Contudo, estudos de configurações mais complexas podem ser encontrados na literatura (FREEMAN *et al.*, 1979; STERLING, STERLING; COLLINS, 2012).

A vantagem dos sistemas que empregam a bomba de calor como fonte de energia auxiliar é a utilização da bomba de calor em detrimento do aquecedor auxiliar elétrico (ou a gás) comumente empregado, já que utilizam a energia elétrica de forma mais eficiente.

Freeman *et al.* (1979) analisaram o desempenho dos sistemas de três diferentes sistemas solares combinados com bombas de calor: sistema em série, sistema em paralelo e sistema *dual-source*. No primeiro, uma bomba de calor líquido-líquido é utilizada para transferir energia do reservatório conectado ao coletor solar para o ambiente fechado a ser aquecido, como pode ser visto na Figura 5. Quando a temperatura da água no reservatório for suficiente para satisfazer a demanda de condicionamento de ar, é utilizado um caminho alternativo (*bypass*) para a corrente de fluido e a corrente de ar é aquecida diretamente pelo fluido de armazenamento. Já o

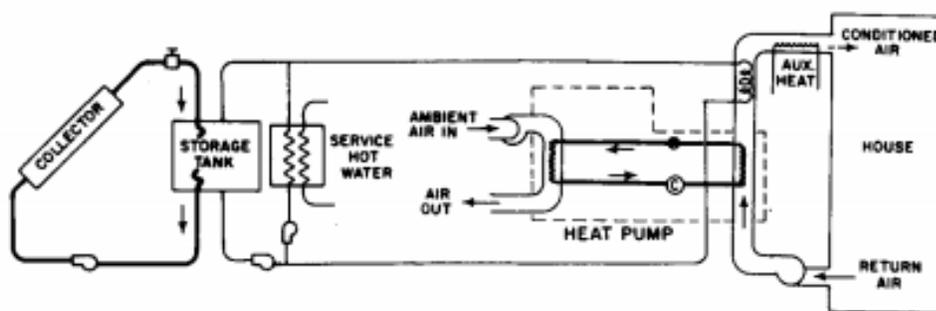
aquecimento de água ocorre em um circuito independente, através da troca de calor direta entre a corrente de consumo de água e o reservatório de armazenamento (*service hot water*, na figura).

Figura 5 – Esquema do sistema solar combinado em série com bomba de calor estudado por Freeman (1979).



No sistema em que a bomba de calor é combinada em paralelo com o sistema de aquecimento solar, uma bomba de calor ar-líquido é conectada apenas à corrente de ar, como fonte de energia auxiliar (*backup*). Portanto, o coletor solar e a bomba de calor operam em regimes independentes. O aquecimento da água ocorre da mesma forma que no sistema em série. O esquema deste sistema é apresentado na Figura 6.

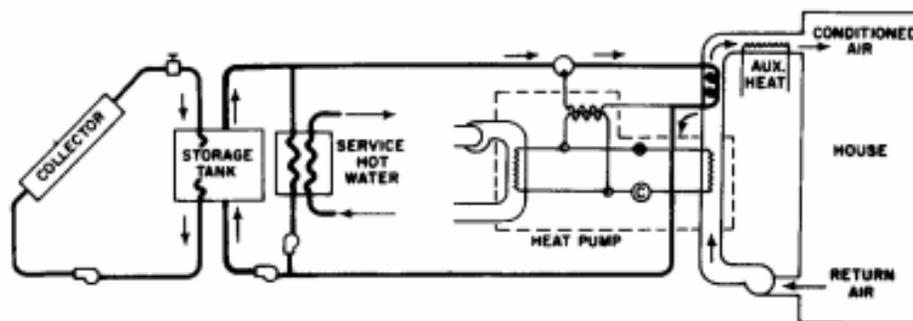
Figura 6 – Esquema do sistema solar combinado em paralelo com bomba de calor estudado por Freeman (1979).



Por fim, o sistema *dual-source* pode ser visto como uma combinação dos dois sistemas anteriores (Figura 7). Ao empregar dois evaporadores – um combinado à corrente de fluido de armazenamento e outro combinado à corrente de ar externo – este sistema pode utilizar como fonte de energia tanto a energia solar coletada quanto o ar ambiente. Neste caso, são

possíveis três modos diferentes de operação para realizar o condicionamento do ar: diretamente pelo fluido de armazenamento (*bypass*), através da bomba de calor em modo líquido-líquido (sistema em série) e através da bomba de calor em modo ar-líquido (sistema em paralelo). Novamente, o aquecimento de água é realizado de forma independente.

Figura 7 – Esquema do sistema solar combinado com bomba de calor *dual-source* estudado por Freeman (1979).

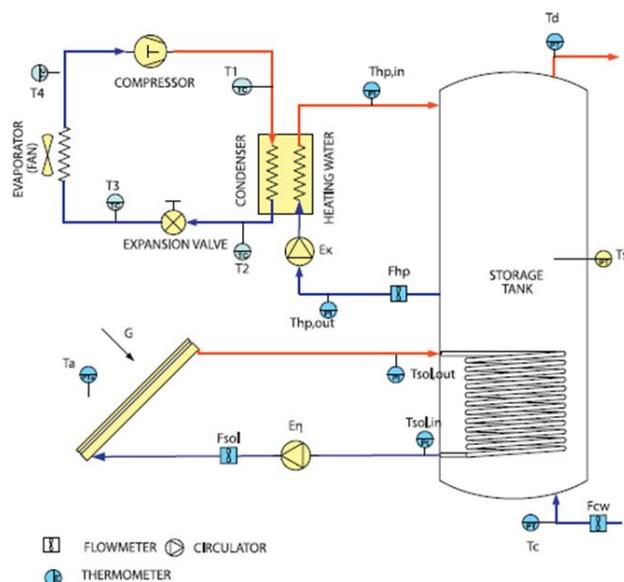


Foi verificado que tanto o sistema em série quanto o sistema *dual-source* tem seu desempenho prejudicado, pois as temperaturas máximas experimentadas pelo reservatório de armazenamento ao longo do ano são inferiores em relação às verificadas no sistema em paralelo, devido à operação da bomba de calor. Com isso, nestes sistemas a frequência de utilização do *bypass* é menor e a fração de demanda por energia auxiliar é maior.

Os sistemas em série e *dual-source* proporcionam condições mais adequadas de operação para o coletor solar e a bomba de calor, o que reflete em valores superiores de eficiência do coletor solar e coeficiente de desempenho da bomba de calor, com relação ao sistema em paralelo. Contudo, os resultados mostraram que o sistema em paralelo ainda possui melhor desempenho térmico global, apesar de apresentar menor eficiência do coletor solar coeficiente de desempenho, já que o maior nível de temperatura do reservatório permite utilizar o *bypass* e aquecer o ambiente diretamente.

Paranas *et al.* (2013) propuseram um sistema solar térmico combinado com bomba de calor, no qual uma bomba de calor ar-líquido serve como fonte de energia auxiliar do sistema (Figura 8). Nesta configuração, ambos a bomba de calor e o coletor solar entregam calor ao reservatório em regimes de operação independentes. O modelo proposto foi experimentalmente validado pelos autores.

Figura 8 – Configuração do sistema proposto por Paranas (2013).



Neste estudo, o perfil de consumo de água quente imposto ao sistema consistiu de apenas uma retirada de água ao longo do dia: 560 litros de água a 318 K (45 °C) às 18h, o equivalente a dois tanques. Os autores simularam também a retirada de água equivalente a apenas um tanque (280 litros), também às 18h, para avaliar a influência do consumo total no comportamento do sistema. A partir dos resultados, concluiu-se que, quando a demanda foi reduzida, a presença de água remanescente no tanque prejudicou a operação da bomba de calor.

Os autores provaram que, no sistema estudado, foi possível reduzir em 70% o consumo dos aquecedores auxiliares, para o clima de Atenas. Além disso, concluiu-se que a temperatura de ativação da bomba de calor é um parâmetro de importância para o desempenho do sistema, pois uma maior temperatura de condensação leva a bomba a operar em condições menos favoráveis, diminuindo assim seu coeficiente de desempenho. O rendimento dos coletores não foi influenciado pela alteração da temperatura de ativação da bomba de calor, já que o circuito do coletor solar é independente do circuito da bomba de calor.

Por fim, foi investigada a influência da capacidade da bomba de calor. Dada uma bomba de calor referência, a capacidade de aquecimento referência foi escalonada por fatores de ½, 1, 2 e 3. Esta análise mostrou que as diferenças não são significativas em termos de coeficiente de desempenho, nem de fator solar, energia útil ou consumo auxiliar.

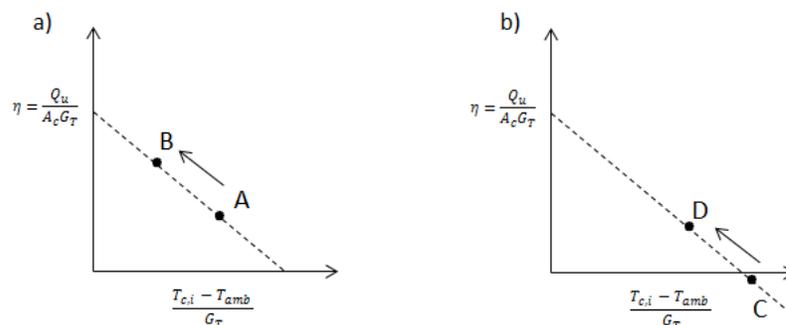
No entanto, deve-se atentar ao fato de que, na configuração proposta, a operação da bomba de calor na parte superior do tanque não afeta significativamente a operação do coletor na parte inferior, de modo que os sistemas solar e da bomba de calor operam independentemente. Além disso, o perfil de consumo utilizado permite que o sistema acumule energia até o final do dia, de forma que o único efeito do aumento da capacidade da bomba verificado foi a diminuição do tempo demandado pelo sistema para se atingir a temperatura desejada para consumo.

Por outro lado, é possível estabelecer configurações nas quais a operação da bomba de calor e a operação do coletor solar não sejam independentes. Neste caso, a função de uma bomba de calor conjugada a um sistema solar é, grosso modo, diminuir a temperatura de entrada da água (ou do fluido que circula no coletor), T_i , no coletor solar, aumentando o potencial de absorção da radiação solar, G_T , e, por consequência, a eficiência do coletor η . A Figura 9 ilustra os efeitos da diminuição de T_i na eficiência de um coletor de placas planas.

Ao diminuir a temperatura de entrada, o ponto de referência A desloca-se para a esquerda sobre a curva, para o ponto B, no sentido do aumento da eficiência, como pode ser visto no gráfico da Figura 12a. Ainda, na Figura 9b, como outro efeito da diminuição de T_i , percebe-se que é possível passar de um ponto de eficiência negativa, ponto C, onde, logicamente, o coletor solar não operaria, para um ponto de eficiência positiva, ponto D, ilustrando o aumento do período de funcionamento do coletor solar. Vale ressaltar que o mesmo efeito é alcançado com a diminuição da temperatura ambiente, T_a , mas que este é um parâmetro de difícil ou nenhum controle (STERLING, 2011).

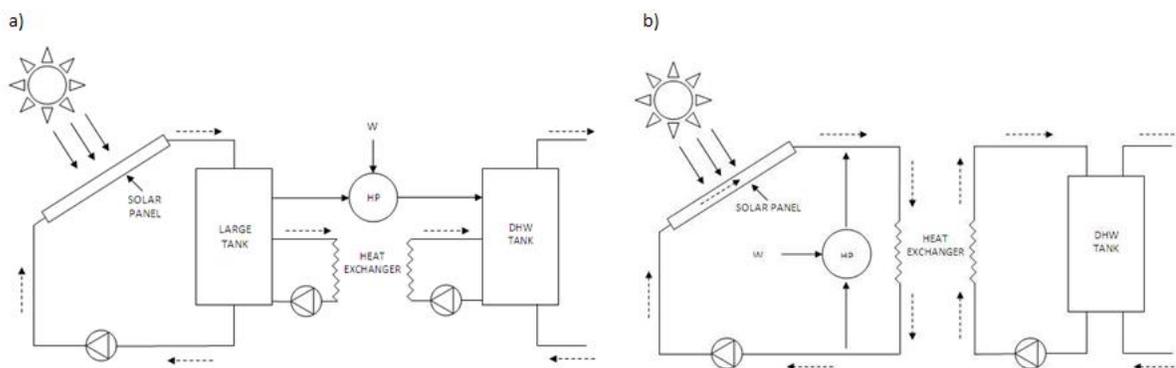
Neste contexto, Sterling (2011) comparou o desempenho de duas configurações distintas de sistemas solares assistidos por bomba de calor ao desempenho dos sistemas convencional elétrico e convencional solar para fornecimento de água a 55 °C para a cidade de Ottawa no Canadá.

Figura 9 – Efeito da diminuição da temperatura do fluido na entrada na curva de eficiência para um coletor solar de placa plana (adaptado de STERLING, 2011).



A primeira configuração, chamada de *Dual Tank i-HPASDHW* (*indirect-Heat Pump Assisted Solar Domestic Hot Water*) pelo autor, utilizou uma bomba de calor líquido-líquido como meio para transferir energia entre os reservatórios solar e de consumo, como pode ser visto na Figura 10a. No segundo sistema (Figura 10b), *Solar-side i-HPASDHW*, uma bomba de calor líquido-líquido foi empregada entre a entrada e a saída de coletor solar, com a finalidade de aumentar a eficiência e o tempo de operação do coletor solar.

Figura 10 – Configurações dos sistemas solares assistidos por bomba de calor estudados por Sterling (2011).



As análises do comportamento dos sistemas mostraram melhor desempenho da configuração *Dual Tank i-HPASDHW* nos dias com baixa radiação solar, enquanto a configuração *Solar-side i-HPASDHW* foi superior nos dias claros de alta radiação. Em termos de fração anual e custos operacionais anuais, a configuração *Solar-side i-HPASDHW* apresentou resultados superiores aos demais sistemas estudados. Entretanto, vale evidenciar que a utilização do sistema solar convencional por si só já promove uma redução de aproximadamente 56% no

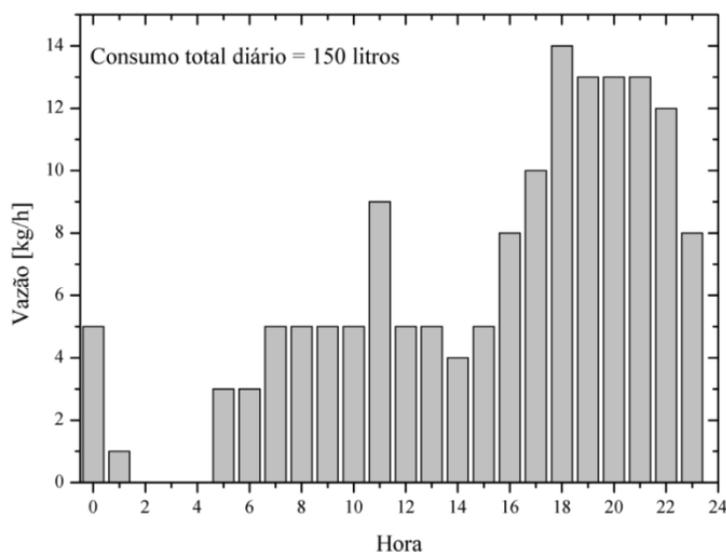
custo de operação anual do sistema com relação ao aquecedor elétrico. Reduções adicionais de 15% e 25% com relação ao sistema solar convencional são proporcionadas pelos sistemas *Dual Tank* e *Solar-side*, respectivamente.

2.3. PERFIL DE CONSUMO

Perfis de consumo acurados são de importância decisiva para os projetos de aquecimento solar de água doméstica, devido ao caráter transiente tanto da radiação solar quanto do próprio perfil de consumo. Os hábitos de consumo, incluindo a quantidade de água, a temperatura e o horário, são influenciados por várias características da residência: ocupação, nível social, qualidade e quantidade de eletrodomésticos instalados, clima regional, entre outros.

Salazar (2004) estabeleceu um perfil de consumo doméstico a partir da monitoração do consumo elétrico de 90 famílias de baixa-renda em Florianópolis-SC. Tal perfil condiz, portanto, com a realidade de consumo para a localidade em questão, sendo também dependente dos hábitos de consumo dos moradores destas 90 residências (Figura 11).

Figura 11 – Perfil de consumo residencial obtido por Salazar (2004).



Ao se dividir a vazão para cada hora do dia pelo consumo total diário de água quente, obtém-se um perfil de consumo normalizado, a partir do qual, por meio de escalonamento, é possível simular aplicações de alto e baixo consumo de água quente, conforme se queira. E é por este motivo que perfis normalizados são comumente mais utilizados na literatura.

A Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*) sugere a utilização de um consumo total diário de 200 litros para o consumo de uma residência com uma única família (IAE, 2003). Outros estudos (PEARLMAN; MILLS, 1985, BECKER; STOGSDILL, 1990; SWAN *et al.*, 2011; DEOREO; MAYER, 2000; PAPAKOSTASN *et al.*, 1995; MEYER; TSHIMANKINDA, 1997) também obtiveram valores de consumo total diário de água quente próximos a 200 litros por dia, como pode ser verificado na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de consumo total diário de água quente para diferentes localidades no mundo.

Localidade	Consumo total diário de água quente (litros por dia)	Consumo total per capita de água quente (litros por pessoa por dia)	Referência
Florianópolis, Brasil	150		Salazar, 2004
Ontario, Canadá	236	47 – 86	Pearlman e Mills, 1985
América do Norte (9 estudos)	239		Becker e Stogsdill, 1990
Residência típica canadense	208	67	Swan <i>et al.</i> , 2011
Seattle, EUA		95	DeOreo <i>et al.</i> , 2000
Johannesburg, África do Sul		88,6 (média de 2,1 pessoas por residência), 66,8 (média de 3,3) e 61,5 (média de 3,7)	Papakostas <i>et al.</i> , 1995
Grécia		32,2	Meyer e Tshimankinda, 1997

Passos (2011) utiliza o perfil de Salazar com o consumo total diário de água quente de 200 litros para avaliar o desempenho de sistemas solares para aquecimento doméstico de água em Florianópolis.

Rankin e Rousseau (2006) traçaram o perfil de consumo de água quente para dois hotéis sul africanos da mesma rede, ambos com o mesmo número de quartos e com as mesmas facilidades instaladas por quarto, além de cozinha e lavanderia centrais. Um deles localizado em

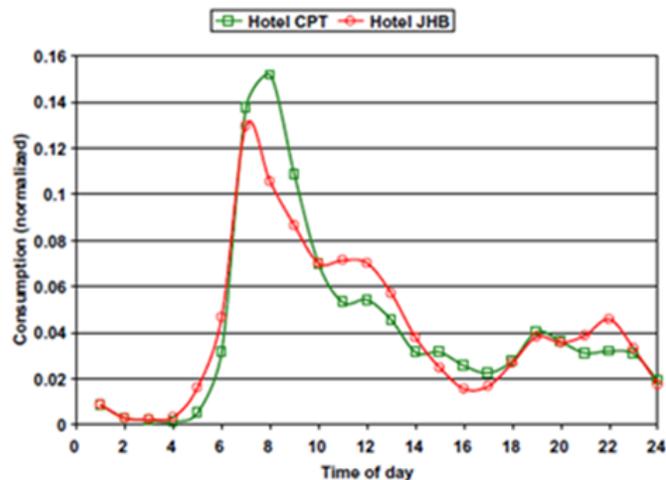
Johannesburg, com clima moderato com chuvas no verão, e outro em Cape Town, caracterizado por clima litorâneo com chuvas no inverno.

Os valores da temperatura da água foram ajustados para 60°C, com base na mesma quantidade de energia por litro de água, a fim de permitir comparações entre diferentes sistemas e períodos do ano. No período estudado de 12 meses, registrou-se uma diferença média de consumo de 23% entre as duas cidades – 93,5 litros por pessoa em Johannesburg e 72,5 litros por pessoa em Cape Town. Além disso, Johannesburg apresentou uma diferença sazonal de consumo de 40%, contra 30% em Cape Town.

Diferenças, estas, devidas principalmente à diferença climática entre as cidades e ao sistema de controle de cada hotel. No hotel em Cape Town, o sistema de controle rápido garante água quente sempre disponível ao usuário, enquanto que, em Johannesburg, a fins de conservação de energia, utiliza-se um sistema de controle de ação demorada, assim, até que haja água disponível na temperatura de consumo, uma significativa quantidade é desperdiçada.

O perfil de consumo diário obtido para cada hotel pode ser visto na Figura 12. Nota-se que ambos apresentam um pico de consumo pela manhã, perto das 7h para Johannesburg e das 8h para Cape Town, o que pode ser justificado pela diferença de uma hora do nascer do sol entre uma cidade de outra.

Figura 12 – Perfil diário normalizado de consumo de água quente por pessoa (RANKIN; ROUSSEAU, 2006).

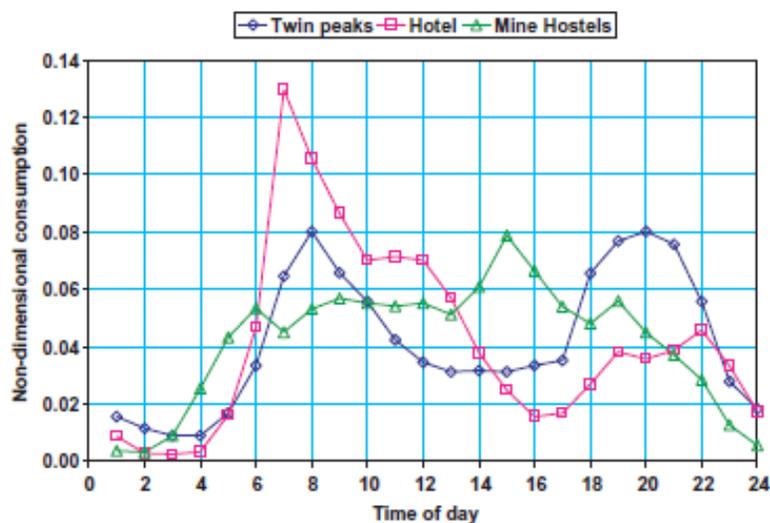


Os autores ainda obtiveram uma correlação entre a razão do consumo de água quente por pessoa e a porcentagem de ocupação do hotel, sendo que quanto menor a ocupação, maior a

razão consumo de água quente por pessoa. A verificação desta correlação pode ser justificada, primeiramente, pela presença das facilidades de lavanderia e cozinha centrais, que requerem um mínimo de água quente para seu funcionamento, caracterizando-se como um consumo mínimo de base. Além disso, devido à utilização menos frequente do sistema, o qual passa, portanto, a operar de forma mais transiente, apresenta maiores perdas.

A comparação do perfil obtido para os hotéis deste estudo com os perfis residenciais encontrados na literatura – comumente chamados de perfil de dois picos (*twin peaks profiles*) – mostra diferenças significativas (Figura 13). O perfil dos hotéis apresenta um pico pela manhã que diminui até ficar aproximadamente constante entre 10h e 12h, quando da operação da lavanderia e da cozinha. Logo em seguida o consumo cai significativamente para apresentar leve aumento no final do dia, coincidindo com a volta dos hóspedes ao hotel. Já o perfil residencial (MEYER; TSIMANKINDA, 1997), mostrado em azul na Figura 13, possui um pico pela manhã 65% menor que o perfil dos hotéis, então o consumo cai e se mantém aproximadamente constante durante o fim da tarde, onde é verificado outro pico, de magnitude similar ao primeiro, às 20h.

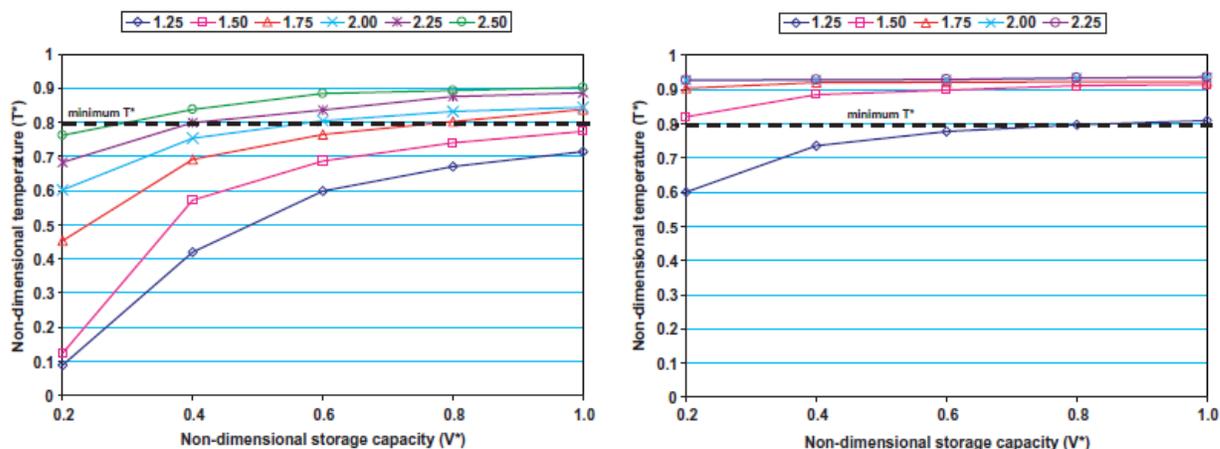
Figura 13 – Comparação do perfil de hotel obtido por Rankin e Rousseau com o perfil residencial de dois picos (*twin peaks*) de Meyer e Tsimankinda (1997) e um terceiro perfil obtido através da monitoração do consumo de residências temporárias para trabalhadores de minas de carvão (*mine hostels*) (RANKIN; ROUSSEAU, 2006).



A análise adimensional realizada pelos autores mostra os efeitos de se utilizar um perfil residencial para representar o consumo de um hotel. Na Figura 14 são apresentadas as

curvas variação da temperatura com a capacidade de armazenamento do sistema e com a capacidade de aquecimento, todos representados por grandezas adimensionais.

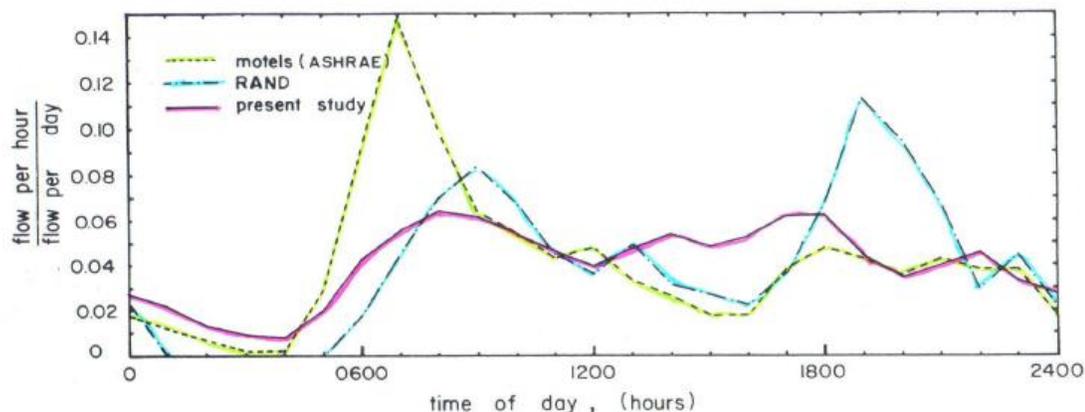
Figura 14 – Variação do valor de temperatura adimensional T^* em função das capacidades de armazenamento e aquecimento adimensionais, V^* e Q^* , para do hotel obtido por Rankin e Rousseau (2006)., à esquerda, e para o perfil de consumo de dois picos, à direita (RANKIN; ROUSSEAU, 2006).



Verifica-se que o perfil dos hotéis sofre maior influência dos parâmetros adimensionais analisados. Para uma mesma capacidade de armazenamento de $V^* = 0,4$, o perfil dos hotéis necessita de uma capacidade de aquecimento 43% maior que aquela necessária para o perfil residencial. Já para uma dada capacidade de aquecimento de $Q^* = 1,75$, a capacidade de armazenamento mínima do sistema operando com o perfil residencial é de $V^* = 0,4$, comparada com $V^* = 0,8$ para o perfil dos hotéis. Percebe-se deste modo que o potencial de redução de pico de consumo em hotéis pode ser muito maior que em residências, o que pode justificar de forma mais categórica a utilização de sistemas solares combinados com bombas de calor.

Um estudo realizado por Kumar *et al.* (1987) em um hotel de luxo de grande capacidade (820 quartos) localizado em Bangkok, Tailândia, resultou em um perfil de consumo bastante distinto. O perfil de consumo de água quente obtido revelou um consumo bem distribuído ao longo do dia, decaindo após as 23h, conforme pode ser visto na Figura 18. O consumo se inicia em torno das 6h da manhã e atinge um ponto de máximo às 8h, coincidindo com o banho da manhã dos usuários. Daí em diante, o perfil não apresenta mais nenhum pico significativo. Entretanto, hotéis de luxo são geralmente destinos de férias dos clientes, sendo assim não representam hábitos de consumo cotidiano.

Figura 15 – Perfil de consumo total diário para hotel de luxo obtido por Kumar *et al.* (1987) (curva em rosa).



Observa-se, no entanto, que o perfil para motéis americanos obtidos pela ASHRAE (em amarelo) se assemelha ao perfil obtido por Rankin *et al.* (2006). Vale ressaltar que, nos Estados Unidos, motéis são instalações que se localizam geralmente à beira de uma rodovia, servindo de alojamento àqueles que estão de passagem e permanecem, portanto, apenas uma noite ou períodos curtos. Assim, pode-se tomar como comparativo brasileiro para motéis, hotéis de baixo custo, mais simples e baratos.

Fica evidente que utilizar um perfil residencial para modelar o comportamento de um sistema para um hotel, sem que sejam feitas ressalvas em relação a essa decisão, pode não ser a melhor escolha em termos de projeto. Por outro lado, conforme os estudos supracitados, o perfil de consumo de água quente, além de depender das características de acomodação e serviços e da localização geográfica do empreendimento, ainda está ligado ao tipo de sistema de acionamento do sistema.

O fato de que o perfil de consumo característico do setor hoteleiro leva à necessidade de sistemas mais robustos, de maior capacidade de aquecimento e/ou de armazenamento em relação aos perfis *twin peaks* (RANKIN; ROUSSEAU, 2006), reforça a ideia de que este setor constitui um cenário promissor de aplicação de sistemas solares combinados a bombas de calor.

3. METODOLOGIA

Visto que tanto a radiação solar quanto o perfil de consumo de água quente introduzem características transientes no modelo, é preciso que as ferramentas empregadas na metodologia sejam adequadas a esta particularidade.

Neste contexto, o TRNSYS (*Transient System Simulation Tool*) é uma ferramenta de simulação extremamente flexível e abrangente, direcionada a simulações do comportamento dinâmico de sistemas transientes, com ênfase em sistemas térmicos e simulações de longo prazo (STARKE, 2013), sendo, portanto, adequada à particularidade do trabalho em questão. Ainda, este *software* é justamente adequado para a avaliação global do sistema e não para a análise detalhada de um componente em especial (WENDEL, 2010), já que as análises são direcionadas ao comportamento dinâmico do sistema e os componentes são vistos pelo usuário como uma caixa preta.

A biblioteca padrão do TRNSYS possui cerca de 150 componentes, chamados *Types*, que permitem a simulação de uma vasta gama de equipamentos e utilitários: bombas de calor, coletores solares, turbinas eólicas, processadores de dados climáticos, equipamentos de condicionamento de ar, rotinas de análise econômica, entre outros (KLEIN; ALVARADO, 2010).

O ambiente para o usuário do TRNSYS apresenta é bastante visual e intuitivo, onde cada componente do sistema, representado por um dos *Types*, é adicionado ao projeto e conectado aos outros no sentido de estabelecer fluxos que representam energia ou informação. Cada um destes *Types*, sendo uma caixa preta para o usuário, possui modelos matemáticos próprios, os quais são resolvidos individualmente e os valores de saída do anterior servem de entrada para o componente subsequente.

4. DESCRIÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES

Com base na revisão bibliográfica realizada, optou-se por analisar o caso mais simples em que a bomba de calor é utilizada como fonte de energia de *backup* e uma configuração mais complexa, na qual a bomba de calor atua transferindo energia entre os dois reservatórios térmicos. Além desta, duas configurações de referência foram estabelecidas para fins de comparação, a saber: sistema solar convencional com um reservatório e sistema solar convencional com dois reservatórios em série.

O sistema Convencional 1 (Figura 16a) será utilizado para fins de comparação por ser o sistema de aquecimento solar mais comumente utilizado e já estar consolidado no mercado brasileiro. Este sistema é composto por um campo de coletores conectado a um reservatório térmico (Reservatório Solar) com aquecedor auxiliar de passagem instalado entre o sistema e o usuário. O emprego da bomba hidráulica no circuito do coletor configura um exemplo de sistema ativo. Neste caso, ambos o fornecimento de energia e o consumo de água quente estão conectados ao mesmo reservatório, de maneira que a massa de fluido de armazenamento experimenta duas correntes contrárias de transferência de calor. Em outras palavras, enquanto o coletor solar esquentava o fluido contido no reservatório, o consumo promove o resfriamento devido à realimentação do reservatório com água da rede. No balanço global, esta mistura entre as correntes fria e quente pode diminuir a eficiência do sistema e aumentar a demanda por energia auxiliar.

O sistema Convencional 2 difere do Convencional 1 pela inclusão de um segundo reservatório térmico, o qual tem por objetivo permitir a variação da temperatura do reservatório solar em função da operação do coletor, enquanto a temperatura do reservatório de consumo é mantida próxima à temperatura de demanda pela atuação da resistência elétrica submersa. O esquema da configuração deste sistema é mostrado na Figura 16b.

Com relação aos sistemas combinados, o sistema nomeado Combinado de *backup* é caracterizado pela presença de uma bomba de calor ar-líquido (ASHP – *Air Source Heat Pump*) atuando como fonte de energia auxiliar (ou de *backup*) no reservatório de consumo, como pode ser visto na Figura 16c. Neste caso, a bomba de calor e o coletor solar operam independentemente e a vantagem deste sistema é a utilização da bomba de calor em detrimento

do aquecedor auxiliar elétrico (ou a gás) comumente empregado, já que estas utilizam a energia elétrica de forma mais eficiente. O emprego de dois reservatórios neste sistema é justificado pelo mesmo argumento utilizado anteriormente. Contudo, neste caso, a temperatura do reservatório de consumo é controlada e mantida próxima à temperatura de demanda pela atuação da bomba de calor ar-água.

Por outro lado, o sistema Combinado água-água configura um sistema em que a bomba de calor é conectada em paralelo aos reservatórios, transferindo energia do reservatório solar ao reservatório de consumo (Figura 16d). Além disso, um trocador de calor é também conectado entre os reservatórios, de modo que, quando a temperatura no tanque solar for igual ou superior à temperatura de consumo, a energia possa transferida pelo trocador de calor.

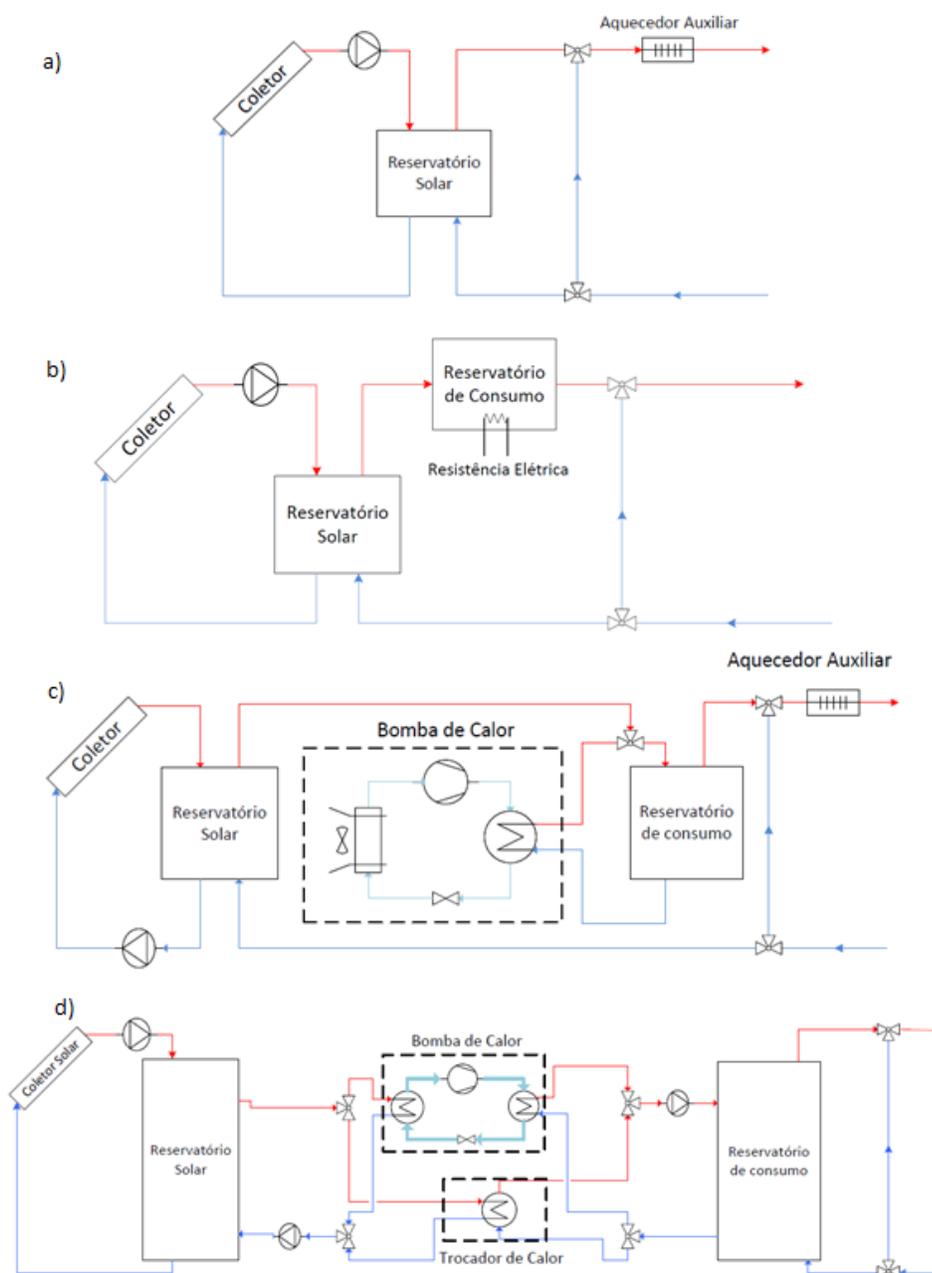
Em certas localidades, a temperatura ambiente pode alcançar valores bastante baixos, tornando possível o congelamento do fluido que circula no coletor solar. Costuma-se utilizar uma mistura 50% etileno glicol/50% água, que possui uma menor temperatura de solidificação do que a água pura. No entanto, a utilização desta mistura requer o emprego de um trocador de calor separando os dois circuitos. No caso brasileiro de estudo, as temperaturas ambientes dificilmente caem abaixo de zero, de forma que não é necessário utilizar um trocador de calor, mas apenas uma tubulação de *by-pass* entre os reservatórios. Assim, para adaptar o modelo do estudo em questão, basta configurar o valor de eficiência do trocador de calor igual à unidade.

Nesta configuração em particular, a instalação da bomba de calor entre os reservatórios tem por objetivo aumentar a eficiência do coletor solar. A operação do coletor solar é controlada a cada passo de tempo através da diferença de temperatura da vazão mássica que entra e o que sai do coletor solar, que representa o potencial de energia a ser absorvida pelo coletor. Assim, se estas temperaturas forem muito próximas, pouca energia será absorvida e o controlador interrompe a circulação de água no coletor solar.

O papel da bomba de calor, neste sentido, é de diminuir a temperatura da água na entrada do coletor solar, aumentando o potencial de energia a ser coletada. À medida que, durante sua operação, a bomba de calor resfria o reservatório solar, a água entra no coletor solar também a temperaturas mais baixas, tendo como consequência, o aumento da quantidade de energia útil coletada e, assim, da eficiência do coletor solar (definida pela razão entre a energia absorvida e a energia incidente). Além disso, pelo mesmo motivo, o período de funcionamento do circuito solar

é estendido, pois, nesta configuração, passa a ser possível coletar energia solar em períodos do dia nos quais a circulação de água no coletor seria interrompida pela atuação do controlador.

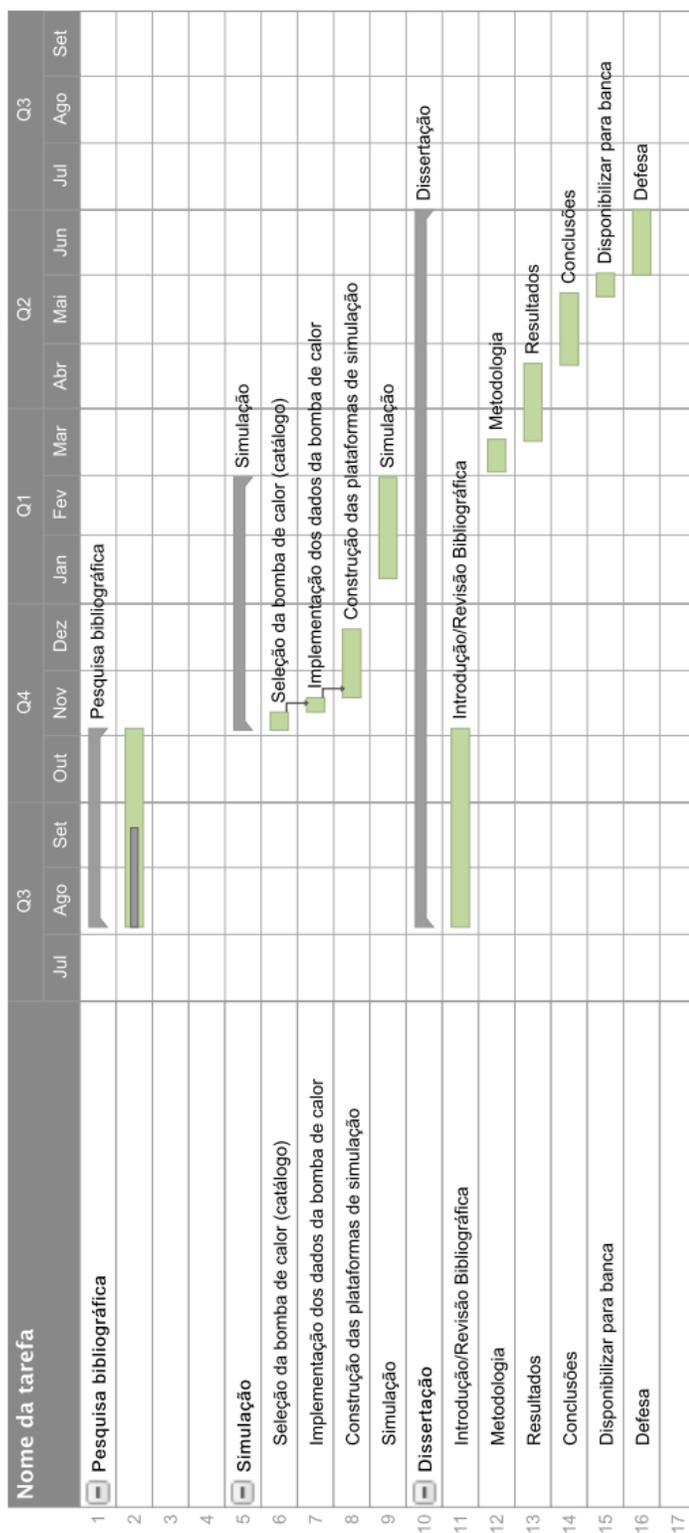
Figura 16 – Configurações estabelecidas a) Sistema solar convencional com reservatório único e aquecedor de passagem (Convencional 1); b) Sistema solar convencional com dois reservatórios em série e resistência auxiliar interna ao reservatório de consumo (Convencional 2); c) Sistema solar com dois reservatórios combinado com bomba de calor ar-água como fonte de energia auxiliar (Combinado *backup*); d) Sistema solar combinado com bomba de calor água-água atuante entre o reservatório solar e o reservatório de consumo (Combinado água-água).



5. CRONOGRAMA

O presente trabalho surge como continuação das atividades realizadas no decorrer do Trabalho de Curso da autora. Foram validadas plataformas de simulação para sistemas solares de aquecimento de água assistidos por bombas de calor e os resultados obtidos justificam a sequência do trabalho na forma da Dissertação de Mestrado. Com base nas conclusões obtidas, foi possível direcionar alguns aspectos relativos ao escopo deste trabalho de Mestrado. Desta forma, parte da revisão bibliográfica permaneceu a mesma e parte foi atualizada. Partindo-se das configurações de estudo descritas no item 4, é possível organizar o cronograma das atividades restantes conforme a Figura 17.

Figura 17 – Cronograma pretendido para as atividades restantes.



REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; BASTO, J. E. *Coletores solares planos para líquidos – determinação do rendimento térmico – ALO SOLAR 1002. Relatório Técnico – RTTC – 01/01*. Florianópolis: LABSOLAR/LEPTEN/UFSC, 2001.

AHMAD, M. W., EFTEKHARI, M., STEFFEN, T., DANJUMA, A. M. *Investigating the performance of a combined solar system with heat pump for houses*. *Energy and Buildings*, v. 63, p. 138-149, 2013.

ASHRAE. *Standard 93-2003: Methods of testing to determine the performance of solar collectors*. ASHRAE. Atlanta, 2003.

BECKER, B. R.; STOGSDILL, K. E. *Development of hot water use data base*. ASHRAE Transactions, v. 96, Part II, p. 422- 427. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 1990.

BRANDEMUEHL, M. J., BECKMAN, W. A., *Economic Evaluation and Optimization of Solar Heating Systems*. *Solar Energy*, Vol. 23, pp. 1, 1979.

CARDEMIL, J. M.; COLLE, S. *A base de dados SWERA como suporte para análises técnico-econômicas de plantas termo-solares*. In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belém-PA, Brasil, 2010.

CHATURVEDI, S.K.; CHEN, D.T.; KHEIREDDINE, A. *Thermal performance of a variable capacity direct expansion solar-assisted heat pump*. *Energy Conversion and Management*, v. 39, p. 181–191, 1998.

CHYNG, J.P.; LEE, C.P.; HUANG, B.J. *Performance analysis of a solar-assisted heat pump water heater*. *Solar Energy*, v. 74, p.33-44, 2003.

DENG, S. *Energy and water uses and their performance explanatory indicators in hotels in Hong Kong*. *Energy and Buildings*, vol. 35, p. 775-784, 2003.

DEOREO, W.B.; MAYER, P.W.; LEWIS, D. *Seattle home water conservation study: the impacts of high efficiency plumbing fixture retrofits in single-family homes*. Seattle Public Utilities and US EPA, 2000.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 3^a ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006.

FREEMAN, T. L.; MITCHELL, J. W.; AUDIT, T. E. *Performance of combined solar-heat pump systems*. *Solar Energy*, v. 22, p. 125-135, 1979.

GUTIERREZ, H. R. V. *Otimização termoeconômica de ciclos de refrigeração termo-movidos assistidos por energia solar, utilizando o método f-phi chart*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

HALASZ, J. Z. *Avaliação experimental do desempenho de bombas de calor*. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 1984.

HEPBASLI, A. KALINCI, Y. *A review of heat pump water heating systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 1211–1229, 2009.

HUANG, B.J.; LEE, J.P., CHYNG, J.P. *Heat-pipe enhanced solar-assisted heat pump water heater*. *Solar Energy*, v.78, p. 375–81, 2005.

KARA, O.; ULGEN, K.; HEPBASLI, A; *Exergetic assessment of direct-expansion solarassisted heat pump systems: review and modeling*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, p. 1383–401, 2008.

KLEIN, S.; ALVARADO, F. *TRNSYS: A transient systems simulation program*. [S.1.]: Madison, Winsconsin: Solar Energy Laboratory, 2010.

KUANG, Y.H.; SUMATHY, K.; WANG, R.Z. *Study on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heating system*. *International Journal of Energy Research*, v. 27, p. 531-48, 2003.

KUMAR, S.; REDDY, T. A.; BONNIX, P. *Hot water usage of a large hotel in Southeast Asia*. *ASHRAE Transactions*, vol. 93, p. 826-831, 1987.

LAFAY, J. M. S. *Análise energética de sistemas de aquecimento de água com energia solar e gás*. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

MADER, R.; GORNI, M.; CUNTO K.; FERRONI L. *Hotelaria em números – Brasil 2013*.
{online} Disponível em:
www.joneslanglasalle.com.br/PressReleaseDocs/Hotelaria_em_numeros_2013.pdf

MANEA, T. F. *Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

MEYER, J. P.; TSHIMANKINDA, M. *Domestic hot water consumption in South African townhouses*. *Energy Conversion Management*, v. 39, n° 7, p. 679-684, 1998.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanco Energético Nacional – Ano base 2012*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2013.

MÜLLER-STEINHAGEN, H., *Test report – Thermal performance of solar collector, Acc. To EN12975 – 2*. 2001, n. 02COL273, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik – Universität Stuttgart, Alemanha, 2002.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Boletim Semanal da Operação*. {online} Disponível em http://www.ons.org.br/resultados_operacao/boletim_semanal/index.htm. Arquivo acessado em 23/06/2014.

PAPAKOSTASN, K. T.; PAPAGEORGIOUB, N. E.; SOTIROPOULOS, B. A. *Residential hot water use patterns in Greece*. *Solar Energy*, v. 54, nº 6, p. 369-374, 1995.

PARANAS, G., MATHIOULAKIS E.; BELESSIOTIS, V. *Investigation of the performance of a combined solar thermal heat pump hot water system*. *Solar Energy*, p. 169-182, 2013.

PASSOS, L. A. A. *Um estudo sobre os impactos técnicos e econômicos da agregação do aquecimento solar de água nos domicílios brasileiros*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

PEARLMAN, M.; MILLS, B. E. *Development of residential hot water use patterns*. ASHRAE Transactions. Vol 91, Part 2A, p. 657-679. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 1985.

PORTA BRASIL. *Rede de transmissão supera 107 mil quilômetros*. {online} Disponível em <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/rede-de-transmissao-supera-107-mil-quilometros>. Arquivo acessado em 16 de abril de 2014.

PORTAL DA FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE HOTELARIA E ALIMENTAÇÃO. *Programa de eficiência energética da FBHA prevê redução de 30% dos custos com energia, água e gás*. {online} Disponível em <http://fbha.com.br/noticias/fbha-news/item/396-programa-de-eficiencia-energetica-da-fbha-preve-resucao-de-30-dos-custos-com-energia-agua-e-gas>. Arquivo acessado em 7 de Julho de 2013.

PORTAL DO JORNAL NACIONAL. *Reservatórios de hidrelétricas já têm nível próximo ao da época do apagão*. {online} Disponível em <http://g1.globo.com/jornal->

nacional/noticia/2014/03/reservatorios-de-hidreletricas-ja-tem-nivel-proximo-ao-da-epoca-do-apagao.html. Arquivo acessado em 16 de abril de 2014.

POZZEBON, F. B. *Aperfeiçoamento de um Programa de Simulação Computacional para Análise de Sistemas Térmicos de Aquecimento de Água por Energia Solar*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988.

PROCEL. *Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso*. Rio de Janeiro: Programa nacional de conservação de energia elétrica, 2008.

RANKIN R., ROUSSEAU, P.G. *Sanitary hot water consumption patterns in commercial and industrial sectors in South Africa: Impact on heating system design*. Energy Conservation and Management, vol. 47, p. 687-701, 2006.

REVISTA HOTÉIS. *A hora e vez da energia solar nos hotéis*. {online} Disponível em <http://www.revistahoteis.com.br/materias/7-Especial/74-A-hora-e-vez-da-energia-solar-nos-hoteis>. Arquivo acessado em 7 de Julho de 2013

ROSA, F. N. *Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

SALAZAR, J. P. *Economia de energia e redução do pico da curva de demanda para consumidores de baixa renda por agregação de energia solar térmica*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SCARPA, F.; TAGLIAFICO, L. A.; TAGLIAFICO G. *Integrated solar-assisted heat pumps for water heating coupled to gas burners; control criteria for dynamics operation*. Applied Thermal Engineering, v. 31, p. 59-68, 2011.

STARKE, A. R. *Simulação de sistemas de aquecimento para piscinas através de bombas de calor assistidas por energia solar*. Trabalho de curso – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

STARKE, A. R. *Uma análise de sistemas de aquecimento de piscinas domésticas através de bombas de calor assistidas por energia solar*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

STERLING, S. J. *Feasibility analysis of two indirect heat pump assisted solar domestic hot water systems*. Thesis (Master of Applied Science), Canadá, 2011.

STERLING, S. J.; COLLINS, M. R. *Feasibility analysis of an indirect heat pump assisted domestic hot water system*. *Applied Energy*, v. 93, p. 11-17, 2012.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. *Refrigeração e Ar condicionado*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

SWANB, L. G.; EVARTSA, J. C. *Domestic hot water consumption estimates for solar thermal system sizing*. *Energy and Buildings*, v. 58, p. 58–65, 2013.

TAPIA, G. I. M. *Otimização termoeconômica de ciclo de refrigeração por compressão por ejetor auxiliado com energia solar*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY. *Solar Heating Systems for Houses – A design handbook for solar combisystems*. Solar Heating and Cooling Executive Committee of International Energy Agency. Londres: James&James (Science publishers), 2003.

WENDEL, M. *Metodologia para simulação transiente de uma pequena central heliotérmica*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.