

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMA CENTRAL DE
AQUECIMENTO SOLAR ASSOCIADO A BOMBAS DE CALOR PARA
EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS NA CIDADE DE SÃO PAULO-SP**

Rafael de Oliveira Leite

São Paulo

2014

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMA CENTRAL DE
AQUECIMENTO SOLAR ASSOCIADO A BOMBAS DE CALOR PARA
EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS NA CIDADE DE SÃO PAULO-SP

Relatório do trabalho de formatura
apresentado à Escola Politécnica da USP
para a obtenção do título de Graduação em
Engenharia Mecânica.

Rafael de Oliveira Leite

Orientador: Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto

São Paulo

2014

RESUMO

De acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2007), 80,9% das residências brasileiras aquece a água para banho de algum modo, sendo a forma mais utilizada o aquecimento elétrico (75,9% das residências do país). Isso corresponde, segundo o Atlas de energia elétrica do Brasil, divulgado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2002), a cerca de 20.000 GWh de energia elétrica, sendo boa parte deste consumo concentrado nos horários de pico de demanda (das 17h às 20h). Deste modo, a implantação de alternativas que reduzam o consumo de energia devido ao aquecimento de água em residências apresenta um enorme potencial no Brasil, tanto do ponto de vista do consumidor, que deseja reduzir o consumo de eletricidade, como também das empresas geradoras de energia, que buscam alternativas que reduzam os custos elevados para atender a demanda de pico.

Assim, o foco de estudo deste trabalho consiste em avaliar a implantação de um sistema integrado de aquecimento de água, composto por bombas de calor e coletores solares em três tipologias de edifícios residenciais na cidade de São Paulo-SP. Cada tipologia de edifício apresentará uma demanda de água quente particular, no entanto, serão consideradas as mesmas condições climáticas para fins de comparação. Com isso, visa-se avaliar o desempenho deste sistema em comparação com o sistema baseado na utilização apenas de bombas de calor e, assim, avaliar a sua viabilidade econômica e o tempo de retorno para este tipo de investimento na cidade de São Paulo-SP.

Para tal, foram estudados os sistemas solares de aquecimento e os sistemas de aquecimento por bomba de calor de forma isolada. Em seguida, foram estudadas as formas de associação entre eles para então, selecionar a melhor forma e definidos os perfis de demanda a serem atendidos, realizar o dimensionamento do sistema, como também a seleção de equipamentos. Com o projeto finalizado, seu desempenho será avaliado de modo a obter o tempo alcançado para retorno sobre o investimento e então verificar a sua viabilidade.

ABSTRACT

According to the National Program of Electric Energy Conservation (PROCEL, 2007), 80.9% of the Brazilian residences needs to heat water for shower and 75.9% of them use electrical heaters. This represents 20.000 GWh of the consumption of electrical energy in the country (most of it concentrated in the peak time, from 5pm to 8pm), according to the Brazilian Atlas of electrical energy, published by the National Agency of Electric Energy (ANEEL, 2002). Therefore, the implementation of more economic alternatives has a great potential in Brazil, from the customer's and the energy supplier's point of view, since customers want to reduce the energy bill and the companies have looked for alternatives to reduce the consumption in the peak time, which represents significant additional costs.

Therefore, this study consists in evaluating the implementation of an integrated water heating system, composed by heat pumps and solar collectors in three different topologies of residential buildings in São Paulo, Brazil. Each topology will have a different hot water demand, but all of them will be under the same weather conditions for comparisons. The main objective is to evaluate the performance of this integrated system and to compare the results provided by a water heating system composed only by heat pumps.

In order to provide such comparisons, the solar and heat pumps water heating systems are going to be studied separately and then the integration of the two systems will be studied in order to define the best configuration. Finally, the performance of the designed solution will be analyzed to verify the payback period, taking into account all the investments that will be needed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Total de demanda energética atendida por tipo de sistema de aquecimento (adaptado de LAZZARIN, 2012).....	6
Figura 2: Esquema de sistema de aquecimento solar de água (SOLETROL, 2013) ...	7
Figura 3: Corte de coletor solar de placa plana (SOLARES, 2013)	9
Figura 4: Vista lateral de um coletor solar de tubo a vácuo (MANEA et al, 2012).....	9
Figura 5: Coletor solar de tubo a vácuo (ROSA, 2012)	10
Figura 6: Ciclo padrão de refrigeração por compressão de vapor	12
Figura 7: Esquema de associação em paralelo entre bomba de calor e coletores solares (KAYGUSUZ et al, 1995, apud LAZZARIN, 2012)	14
Figura 8: Associação " <i>Dual Source</i> " para aquecimento de piscina (STARKE et al, 2012)	15
Figura 9: Tempo de banho por pessoa (PROCEL, 2007, apud LEITE, 2011)	16
Figura 10: Demanda de água quente ao longo do dia para a Tipologia I (LEITE, 2011)	17
Figura 11: Demanda de água quente ao longo do dia para a Tipologia II (LEITE, 2011)	18
Figura 12: Demanda de água quente ao longo do dia para a Tipologia III (LEITE, 2011)	18
Figura 13: Gráfico de eficiência comparada de coletores. a) Utilizando área absorvedora b) Utilizando área total (MANEA, 2012)	19
Figura 14: Fração de energia gratuita em relação ao consumo total de energia X área dos coletores solares (LAZZARIN, 2012)	20
Figura 15: Configuração adotada	22
Figura 16: Representação esquemática do sistema de distribuição de água quente ..	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre coletores solares de placa plana e tubos evacuados (adaptado de ROSA, 2012)	10
Tabela 2: Características das tipologias definidas (LEITE, 2011).....	15
Tabela 3: Demanda diária de água quente por tipo de edifício	17
Tabela 4: Fator de ocupação em função do número de unidades (ABRAVA et al) ..	24
Tabela 5: Fator de orientação em função do desvio do norte geográfico (ABRAVA et al, 2013).....	24
Tabela 6: Características das tipologias	26
Tabela 7: Tamanho dos reservatórios selecionados por tipologia	26
Tabela 8: Resultados dos Sistemas de Aquecimento Solar por tipologia	26
Tabela 9: Resultados do dimensionamento dos sistemas auxiliares por tipologia	27
Tabela 10: Configuração e bomba de circulação do circuito primário por tipologia.	28
Tabela 11: Vazão de recirculação por tipologia.....	30
Tabela 12: Bombas de circulação por tipologia	30
Tabela 13: Custos de instalação	31
Tabela 14: Custo anual de operação (em R\$)	32
Tabela 15: Tempo de retorno sobre investimento.....	32

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Aquecimento de água para uso residencial no Brasil	1
1.2 A energia solar	2
1.3 Objetivos do trabalho	3
2. Revisão Bibliográfica	4
3. Sistemas de aquecimento solar de água	7
3.1 Tipos de coletores solares	7
3.1.1 Coletores solares de placa plana	8
3.1.2 Coletores solares de tubo a vácuo	9
3.1.3 Diferenças entre os tipos de coletores solares	10
3.3 Circulação de água: natural ou forçada	11
3.3 Sistema auxiliar	11
4. Bombas de calor	12
4.1 Princípio de funcionamento	12
4.2 Formas de associação entre coletores solares e bombas de calor	13
4.2.1 Associação em série	13
4.2.2 Associação em paralelo	13
4.2.3 Associação “Dual source”	14
5. Perfil de demanda de água quente	15
5.1. Definição das tipologias de edifícios	15
5.2. Demanda de água quente por tipologia	16
6. Definição da configuração do sistema	18
6.1. Critérios de seleção	19
6.2. Avaliação das soluções	19
6.2.1 Tipo de coletor solar	19
6.2.2 Forma de associação entre coletores solares e bomba de calor	20
6.2.3 Local de instalação	21
6.2.4 Sistema de medição de consumo	21
6.3. Layout da Configuração adotada	21

7. Dimensionamento do Sistema de Aquecimento	22
7.1. Metodologia	22
7.2. Hipóteses.....	23
7.3. Dimensionamento do circuito primário	23
7.4 Dimensionamento do circuito secundário	29
8. Análise econômica.....	31
8.1 Levantamento dos custos de instalação	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
APÊNDICE A – Dados climáticos de Vicenza (Itália) e São Paulo (Brasil).....	37
APÊNDICE B – Dados técnicos: Bombas de Calor	39
APÊNDICE C – Perda de carga na tubulação	40

1. Introdução

1.1. Aquecimento de água para uso residencial no Brasil

De acordo com o PROCEL (PROCEL, 2007), 80,9% das residências brasileiras aquecem a água para banho de algum modo, sendo a forma mais utilizada o aquecimento elétrico (75,9% das residências do país). De acordo com o Atlas de energia elétrica do Brasil, divulgado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2002), cerca de 20.000 GWh de energia elétrica são consumidos para aquecimento de água, sendo boa parte deste consumo concentrado nos horários de pico de demanda (das 17h às 20h). Segundo (FERRARI, 1996, ANEEL, 2002), cerca de 50% dos chuveiros elétricos são ligados entre 18h e 19h e, de acordo com a ANEEL (ANEEL, 2002), estima-se em 12,8% a contribuição do chuveiro elétrico na demanda máxima de energia no sistema elétrico brasileiro, o que corresponde a 6800 MW de potência instalada, o que equivale a quase metade da potência instalada de Itaipu.

Dentre as alternativas existentes, a utilização de chuveiros elétricos é, sem dúvida, a que apresenta o maior impacto sob o ponto de vista de consumo energético da rede elétrica. Diante deste cenário e da demanda crescente por energia elétrica no país, a adoção de alternativas mais econômicas que se utilizem de fontes gratuitas de matéria-prima, como bombas de calor e energia solar para aquecimento de água, apresentam um enorme potencial de crescimento no Brasil. Por isso, o Governo Federal vem atuando de forma a estimular este tipo de projeto. O Programa “Minha casa, Minha vida”, por exemplo, incentiva a instalação de aquecimento de água via coletores solares em 100% das casas entregues na segunda etapa do programa. A Caixa Econômica dispõe de linhas de crédito de cerca de R\$ 400 milhões para financiamento de projetos que incentivem o uso de aquecimento solar em residências (ANEEL, 2002). Tais dados, associados a um mercado imobiliário em crescimento, se traduzem em um cenário bastante positivo para a implantação de formas alternativas à resistência elétrica para aquecimento de água em residências.

1.2 A energia solar

O Sol é a fonte primária de quase todas as formas de energia aproveitáveis pelo homem. As duas principais formas de aproveitamento econômico direto da energia solar são para geração de energia elétrica, por meio de painéis fotovoltaicos, e para aquecimento de água, seja para uso doméstico ou industrial, por meio dos coletores solares. O Brasil, apesar dos elevados níveis de irradiação solar durante todo o ano, ocupa apenas a 7ª posição em aproveitamento da energia solar, atrás de países com níveis de radiação solar mais baixos, como Japão e Alemanha. Em termos de utilização para aquecimento de água, apenas 0,4% das residências utilizam energia solar de algum modo (PROCEL, 2007).

O aproveitamento da energia solar, que começou a crescer continuamente após os choques do petróleo na década de 70, apresenta algumas vantagens relevantes que a tornam atrativa. Por exemplo, ao contrário de outras formas de energia, a matéria-prima é ilimitada e seu custo é nulo, além disso, não há emissão de poluentes em sua operação.

Por outro lado, os investimentos iniciais para aproveitamento da energia solar ainda são elevados, comparados com outras formas de energia. Segundo a Associação Brasileira de Refrigeração e Ar Condicionado (ABRAVA, 2000), o preço de um coletor solar para uso em uma residência de baixa renda é de cerca de R\$ 550,00, enquanto que o preço de um chuveiro elétrico convencional é de cerca de R\$ 15,00 (ABRAVA, 2000, apud ANEEL, 2002). Além disso, o aproveitamento da energia solar não pode ser o único sistema de aquecimento a ser adotada, dado que seu uso é limitado ao período em que há radiação solar e este período, por sua vez, pode variar sensivelmente ao longo do ano a depender da região do país.

Em 3 de Julho de 2007, foi sancionada a Lei nº 14.459 na cidade de São Paulo. Esta lei estabelece como obrigatório que todas as novas edificações destinadas ao uso residencial (exceto as habitações de interesse social) que possuam até três banheiros por unidade habitacional devem incluir em seu projeto toda a infraestrutura para uma futura instalação de um sistema de aquecimento solar (SAS). As novas edificações com número de banheiros igual ou superior a quatro por unidade habitacional devem, obrigatoriamente, realizar a instalação do SAS. Quando se trata do aquecimento de piscinas, a lei também estabelece como obrigatória a implantação

do SAS. A lei estabelece que a instalação do SAS deve atender a, no mínimo, 40% da demanda de energia do sistema e seguir as normas da ABNT sobre o assunto. Este exemplo vem repercutindo em outras cidades, como Porto Alegre, Rio de Janeiro, Recife, entre outras. Assim, no médio prazo, a perspectiva de utilização de um sistema de aquecimento de água via energia solar apresenta um potencial de crescimento representativo. (FRETIN et al, 2008)

1.3 Objetivos do trabalho

O foco de estudo deste trabalho consiste em avaliar a implantação de um sistema integrado de aquecimento de água, composto por bombas de calor e coletores solares em três tipologias de edifícios residenciais na cidade de São Paulo-SP. Cada tipologia de edifício apresentará uma demanda de água quente particular, no entanto, serão consideradas as mesmas condições climáticas para fins de comparação. Com isso, visa-se comparar o desempenho deste sistema com o sistema baseado na utilização apenas de bombas de calor e, assim, avaliar a sua viabilidade econômica e o tempo de retorno para este tipo de investimento na cidade de São Paulo-SP.

2. Revisão Bibliográfica

A fim de alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi feito um levantamento de trabalhos acadêmicos já realizados sobre o tema. As referências citadas contribuíram para a elaboração do presente trabalho.

NEVES (2013) avaliou a instalação de um coletor solar de tubo a vácuo do tipo *all-glass*, com área igual a 4,16m² e rendimento de 51%, na cidade de Cascavel-PR para aquecimento de água para uma residência com consumo de 120 litros de água quente (a 40°C) por dia, concentrado no fim da tarde. O autor considerou três cenários: no primeiro, a resistência elétrica auxiliar permaneceu ligada durante todo o dia. No segundo, a resistência elétrica auxiliar era acionada apenas no período da tarde, entre 12h e 18h. E no terceiro, a resistência elétrica auxiliar esteve sempre desligada. No cenário 3, a temperatura de banho requerida não foi alcançada em 14 dos 28 dias do experimento, confirmando a hipótese de que o sistema de aquecimento solar de água não é viável sem um sistema auxiliar. Por outro lado, comparando os resultados do cenário 1 e 2, notou-se uma redução de 72,68% do consumo médio de eletricidade diário no cenário 2 em relação ao cenário 1. Levando-se em conta os investimentos iniciais necessários, a alternativa do cenário 2 apresentou um período de retorno de investimento simples de 7,2 anos.

ROSA (2012) comparou o desempenho de coletores solares de placa plana e de tubo a vácuo nas condições climáticas de Belo Horizonte-MG, Fortaleza-CE e Porto Alegre-RS por meio de simulações numéricas. Dos resultados obtidos, pôde-se identificar que os coletores de tubo a vácuo apresentam rendimento significativamente melhor que os coletores de placa plana em termos de área absorvedora, no entanto, se o rendimento é calculado levando em consideração toda a área útil ocupada, o ganho real não é significativo. Além disso, notou-se que quanto mais quente o local, menor é o ganho de rendimento proporcionado pelo coletor de tubo a vácuo. Foram identificadas situações que o coletor de placas planas alcançou até rendimentos superiores, de modo que se chegou a conclusão que, de forma geral, a instalação de coletores de tubo a vácuo no Brasil ainda não é viável tendo em vista o seu elevado preço no mercado nacional, exceto em condições especiais, como áreas serranas no Sul do país, onde o inverno é mais rigoroso.

CHAN et al.(2005) realizaram um estudo do potencial de implementação de um sistema centralizado de aquecimento solar de água para um edifício “arranha-céu” em Hong-Kong utilizando apenas as fachadas laterais, tendo em vista a limitação de espaço e o elevado custo do m² da superfície lateral dos edifícios na cidade. Com 840m² de área de coletor, conseguiu-se obter água a uma temperatura média anual de 41,4°C e redução de consumo de eletricidade de 1146 GJ/ano, com eficiência de 38,4% nos coletores de placa plana utilizados. A economia total obtida pelo sistema implantado foi de 53,4% em relação ao consumo de eletricidade sem o sistema de aquecimento solar, o que resultou em um retorno sobre capital investido de 6,9 anos, sem levar em consideração o ganho energético pela redução de consumo do sistema de climatização devido a instalação das placas.

LAZZARIN (2012) comparou o desempenho de diferentes configurações do sistema de aquecimento composto por uma bomba de calor assistida por coletores solares. Das quatro configurações estudadas entre a bomba de calor e os coletores (associação em série; em paralelo; em série-paralelo ou “*dual source*”; e bomba de calor a ar convencional), verificou-se que, para a mesma área de coletor, a associação em série é a que apresenta a maior eficiência na superfície coletora, no entanto, em termos de fração da energia total demandada para aquecimento que advém de fontes gratuitas, a associação “*dual source*” é a que apresenta menor custo de operação, maximizando o aproveitamento da energia solar e da energia proveniente do ar para a bomba de calor. Os resultados mostraram que 80% da energia demandada pelo sistema de aquecimento da água foi captada do sol ou do ar na associação “*dual source*”, contra 60% na associação em série e cerca de 75% na associação em paralelo. Sistemas solares de aquecimento sem sistema de aquecimento elétrico auxiliar conseguiram captar apenas 25% da energia necessária, sendo que um resumo dos resultados é apresentado na figura 1.

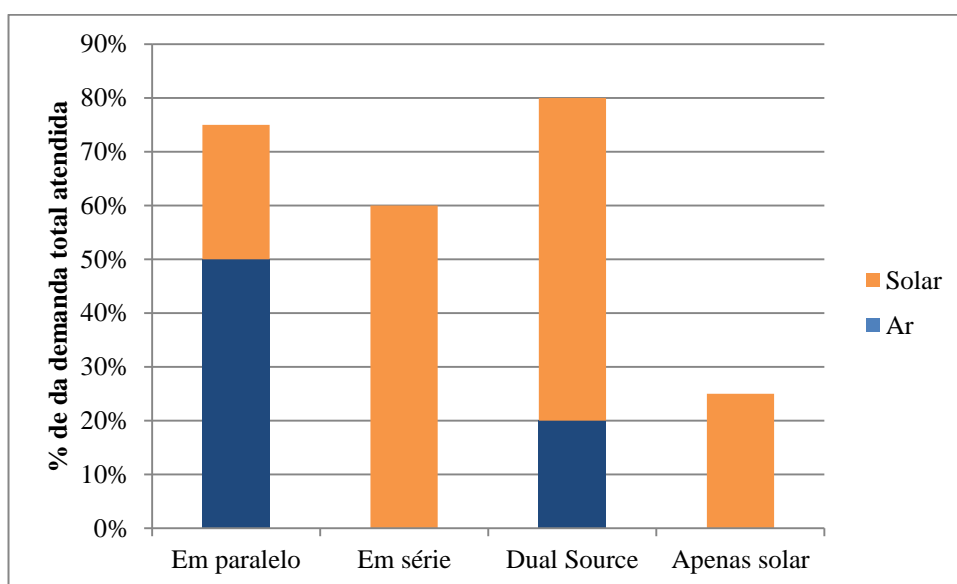


Figura 1: Total de demanda energética atendida por tipo de sistema de aquecimento (adaptado de LAZZARIN, 2012)

Disto, concluiu-se que o sistema integrado de bomba de calor e coletores solares apresenta melhor desempenho em todas as situações, se comparado ao sistema solar exclusivo; e, o melhor modo de associar bombas de calor e coletores solares é por meio da associação “*dual source*”.

STARKE, et al. (2012) realizaram simulações com o objetivo de comparar o desempenho de uma bomba com duas fontes de energia (“*dual source heat pump*”) e uma bomba de calor que utiliza apenas o ar ambiente como fonte de calor, considerando piscinas sem cobertura de 36m² e 24m² na cidade de Florianópolis. Os resultados obtidos mostraram que a bomba com duas fontes de energia apresenta um coeficiente de desempenho maior nesta configuração e que houve um ganho de eficiência nos coletores solares ao trabalharem com temperaturas de entradas mais baixas, o que resultou num custo de operação 43,1% menor em comparação com a bomba de calor que utiliza apenas o ar ambiente como fonte de calor.

3. Sistemas de aquecimento solar de água

Um sistema de aquecimento básico de água por energia solar é composto pelos seguintes componentes:

- Coletores solares, que absorvem a radiação solar;
- Reservatório térmico (também chamado de *boiler*);
- Tubulação;
- Equipamento para circulação de água;
- Um sistema auxiliar de aquecimento, que atua de forma complementar e nos momentos em que não há radiação solar, garantindo o fornecimento de água quente na temperatura desejada.

A figura 2 mostra um esquema de sistema de aquecimento solar de água.

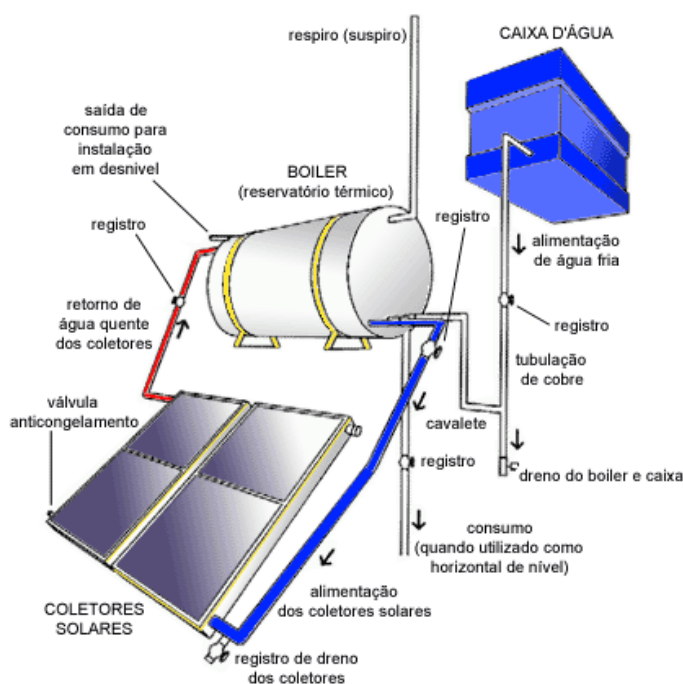


Figura 2: Esquema de sistema de aquecimento solar de água (SOLETROL, 2013)

3.1 Tipos de coletores solares

Quanto ao tipo de coletor solar, os sistemas de aquecimento solar de água variam entre dois tipos principais disponíveis no mercado: os coletores solares de placas planas e os coletores solares de tubo a vácuo. A eficiência de um coletor de placas planas fica entre 35 e 40%, enquanto que os coletores de tubo a vácuo podem chegar de 45 a 50% (REDPATH et al, 2008 apud NEVES, 2013), no entanto, de

acordo com MANEA(2011), em situações meteorológicas mais favoráveis, o coletor de placa plana pode alcançar rendimentos superiores ao de tubo a vácuo. Assim, a escolha do tipo varia de acordo com as condições climáticas, o espaço disponível, a demanda a ser atendida e o orçamento disponível.

Em relação ao posicionamento dos coletores, recomenda-se o posicionamento ao norte geográfico de modo a maximizar a incidência de radiação solar. Quanto a inclinação, ela deve ser igual a latitude do local acrescida de 10°.

3.1.1 Coletores solares de placa plana

Os coletores solares de placa plana são compostos por quatro componentes principais: a cobertura transparente, a placa coletora, o isolante e a carcaça.

A cobertura transparente, em geral, é feita de vidro e é responsável, junto com o isolante, por reduzir as perdas de calor para o meio, produzir o efeito estufa dentro do equipamento e garantir a estanqueidade. Para produzir o efeito estufa que retém a radiação no interior do equipamento, a cobertura transparente deve apresentar alta transmissividade de radiação solar de ondas curtas (ultravioletas), porém baixo coeficiente de transmissão para ondas longas (infravermelho), além disso, a condutividade térmica e a refletividade para ondas longas devem ser altas pelo mesmo motivo. Vale ressaltar que, para baixas temperaturas de operação, podem-se utilizar coletores solares de placa plana sem cobertura, mas a retirada da cobertura implicará em uma redução da eficiência (ROSA, 2012).

Já a placa coletora tem como objetivo absorver a maior quantidade possível de calor proveniente da radiação solar para transferi-lo para o fluido de trabalho do sistema, no caso deste projeto, a água. Normalmente, a placa é feita de cobre, por ser bom condutor térmico e tem a sua face exposta ao sol pintada de preto para aumentar a absorção de radiação solar. Existem diferentes configurações para a placa plana como: peça única com tubos por onde circulam a água soldados ou embutidos; ou na forma de duas placas com espaçamento da ordem de alguns milímetros, por onde circula o fluido.

O isolante, normalmente de lã de vidro, tem a função, como já dito, de reduzir as perdas de carga, principalmente junto a cobertura transparente e na entrada e saída do fluido na placa.

De forma geral, os coletores de placa plana apresentam eficiência menor que de 35 a 40%.

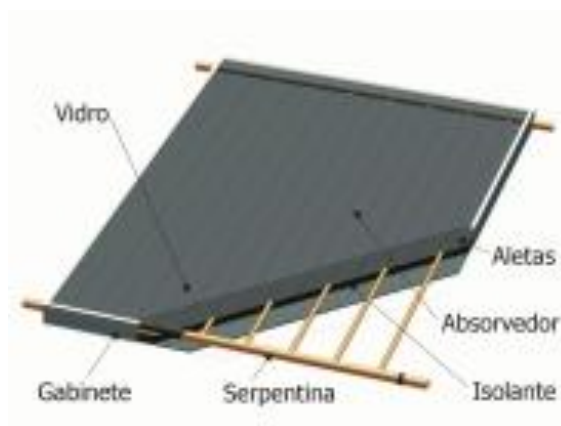


Figura 3: Corte de coletor solar de placa plana (SOLARES, 2013)

3.1.2 Coletores solares de tubo a vácuo

Os coletores solares de tubo a vácuo são compostos por tubos de vidro duplos e concêntricos, com vácuo entre eles. O tubo externo é transparente, para facilitar a transmissão de radiação solar e o tubo interno é escuro, de alta absorção, pois nele passa água a ser aquecida.

O vácuo entre os tubos reduz consideravelmente as perdas térmicas por convecção e condução e permite a operação em situações que requerem maior temperatura de operação e em regiões mais frias, pois a temperatura externa tem pouca influência na água interna.

A figura 4 mostra a vista lateral de um coletor solar de tubo a vácuo.

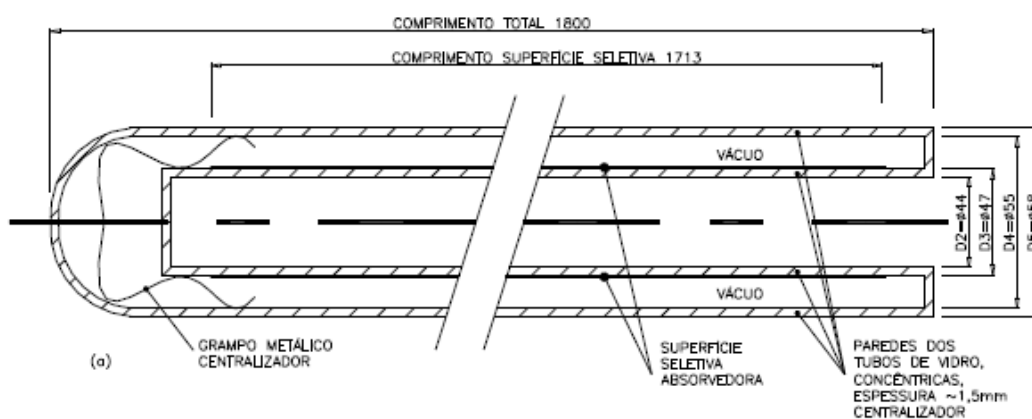


Figura 4: Vista lateral de um coletor solar de tubo a vácuo (MANEA et al, 2012)



Figura 5: Coletor solar de tubo a vácuo (ROSA, 2012)

No Brasil, os coletores solares de tubo a vácuo ainda não são tão populares quanto os de placa plana devido principalmente ao seu maior custo.

3.1.3 Diferenças entre os tipos de coletores solares

As principais diferenças entre os dois tipos de coletores apresentados constam na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre coletores solares de placa plana e tubos evacuados (adaptado de ROSA, 2012)

	Placa plana	Tubos evacuados
Relação Custo / Área absorvedora	Entre R\$ 300 e R\$ 350,00/m ²	Entre R\$ 950 e R\$ 1250,00/m ²
Eficiência (em relação à área absorvedora)	De 35 a 40%	De 45 a 50%
Radiação absorvida	Cresce até às 12h, depois diminui ¹	Constante durante todo o dia, exceto no início da manhã e no final da tarde ²
Relação Área absorvedora	Área total ligeiramente	Área total

/ Área total	maior que a área absorvedora	consideravelmente maior que a área absorvedora
--------------	------------------------------	--

¹ Este fenômeno ocorre devido a alteração do ângulo de incidência causado pela rotação da Terra.

² Nos períodos citados, ocorre o problema da sombra de um tubo no outro, que diminui a área absorvedora.

3.2 Reservatório de água quente

Os sistemas de aquecimento de água por meio de coletores solares requerem, necessariamente, um reservatório que armazenará a água aquecida para utilização posterior durante o período em que não há radiação. Esses reservatórios são também chamados de *boilers* e devem apresentar bom isolamento térmico, para evitar trocas de calor com o meio, além de boa resistência à corrosão. Os reservatórios são compostos de um tanque interno, normalmente de aço inoxidável, revestido por um isolamento térmico, e uma capa externa. O tamanho do reservatório é proporcional à demanda a ser atendida.

3.3 Circulação de água: natural ou forçada

A circulação de água pelo sistema pode ocorrer de forma natural ou forçada. A circulação natural ocorre por meio do processo de termosifão, no qual a água circula por meio do empuxo causado pela diferença de densidade entre a água a uma temperatura maior e a água a uma temperatura menor. A opção pela circulação natural é interessante para sistemas de aquecimento solar de pequeno porte, utilizado para residências unifamiliares, por exemplo. Em sistemas de maior porte, há necessidade de utilização de uma bomba, caracterizando a circulação forçada. A vantagem de utilização de bombas reside no controle da vazão e da pressão de operação do sistema.

3.3 Sistema auxiliar

Segundo ROSA (2012), um sistema de aquecimento de água que utiliza coletores solares não deve, por questões econômicas, ser dimensionado para suprir toda a energia necessária para consumo, o que elevaria excessivamente o custo do projeto, pois há significativa variação nos valores de irradiação em diferentes dias. Assim, para atender à demanda máxima, a instalação deveria apresentar um grande número de coletores que seria capaz de compensar dias de condições climáticas

ruins, mas que ficariam subutilizados em um dia de boas condições climáticas, elevando os custos do projeto desnecessariamente. Assim, torna-se crucial a presença de um sistema auxiliar que irá complementar a atuação dos coletores solares. Este sistema auxiliar pode ser composto por resistências elétricas internas ao reservatório térmico, por exemplo, ou por bombas de calor associadas em série, em paralelo ou série-paralelo com os coletores solares. No presente trabalho, o sistema auxiliar será formado por uma bomba de calor e o seu modo de associação com os coletores solares será discutido no tópico 4.2.

4. Bombas de calor

As bombas de calor são equipamentos que viabilizam a transferência de calor no sentido contrário ao natural, ou seja, de uma fonte quente para uma fonte fria. Normalmente, elas são utilizadas para fins de climatização e aquecimento de água.

4.1 Princípio de funcionamento

Bombas de calor operam de acordo com o ciclo de refrigeração de compressão de vapor, esquematizado na figura 6, e amplamente conhecido na literatura aberta.

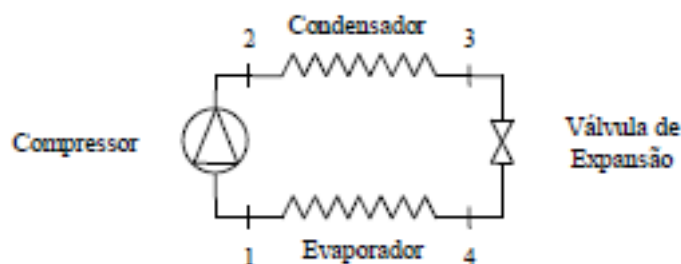


Figura 6: Ciclo padrão de refrigeração por compressão de vapor

Utiliza-se um fluido refrigerante, que percorre o ciclo padrão de refrigeração. No evaporador, ele recebe calor da fonte quente, normalmente ar ambiente, e após passar por um processo de compressão, transfere a sua energia para a fonte fria, no caso, o reservatório de água que se deseja aquecer. Em boas condições de operação, a utilização de bombas de calor proporciona uma economia significativa. Segundo Wolf et al (WOLF et al, 2000, apud, LEITE, 2011), esta economia pode chegar a 60% em relação a energia consumida por chuveiros elétricos. No entanto, como a

temperatura do ar ambiente varia ao longo do ano, a quantidade de calor admitida da fonte quente é variável, portanto, a eficiência (denominada coeficiente de eficácia e calculada pela razão entre o calor absorvido na fonte quente pelo trabalho realizado pelo compressor) deste sistema também é variável, aumentando o consumo de energia elétrica em dias com temperaturas externas de bulbo seco mais baixas.

4.2 Formas de associação entre coletores solares e bombas de calor

Existem três formas possíveis de associação entre coletores solares e bombas de calor: associação em série, em paralelo ou “*dual source*”.

4.2.1 Associação em série

Um sistema de associação em série entre uma bomba de calor e coletores solares ocorre quando o coletor solar opera como fonte de calor para a bomba de calor, em substituição às fontes de calor convencionais. Assim, o calor absorvido do Sol é utilizado para aquecer o fluido refrigerante no evaporador, que transferirá sua energia ao reservatório de água ao passar pelo condensador. LAZZARIN (2012) mostrou que esta configuração só é viável a partir de uma área mínima de coletores solares, pois abaixo desta área, a configuração da bomba de calor convencional a ar se mostra mais eficiente sob o ponto de vista de aproveitamento energético, não justificando os custos extras de implantação de um sistema de coletores solares.

4.2.2 Associação em paralelo

A associação em paralelo entre uma bomba de calor e os coletores solares pode ser representada pela figura 7. Na associação em paralelo, a energia solar é utilizada diretamente para aquecimento da água no reservatório térmico. No reservatório, há um termostato que mede a temperatura e a bomba de calor é acionada apenas de forma complementar, quando a temperatura do reservatório está abaixo da temperatura demandada pelo usuário do sistema.

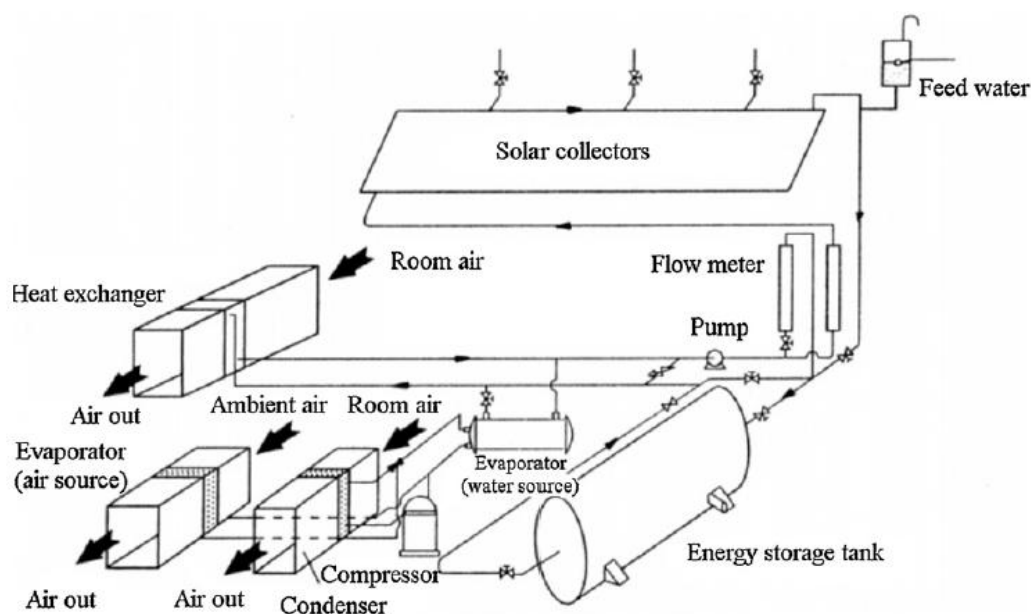


Figura 7: Esquema de associação em paralelo entre bomba de calor e coletores solares (KAYGUSUZ et al, 1995, apud LAZZARIN, 2012)

4.2.3 Associação “Dual source”

A associação “*dual source*” é uma combinação das configurações anteriores e, portanto, mais complexa e cara, mas que permite resultados superiores em termos de aproveitamento energético. Nessa configuração, a bomba de calor opera com dois evaporadores. Normalmente, há um evaporador que utiliza a água como fluido de trabalho que é aquecido pelos coletores solares e um evaporador que troca calor com o ar externo, idêntico ao da bomba de calor convencional. Isto permite que a bomba alcance um maior coeficiente de eficácia, pois o fluido refrigerante recebe maior quantidade de calor nos evaporadores. A figura 8 ilustra um sistema “*dual source*” aplicado para aquecimento de uma piscina.

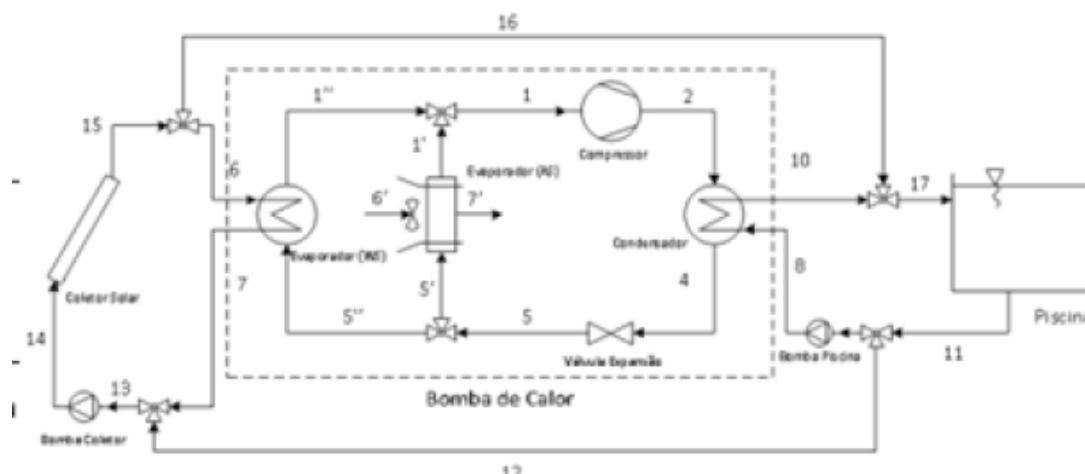


Figura 8: Associação "Dual Source" para aquecimento de piscina (STARKE et al, 2012)

5. Perfil de demanda de água quente

5.1. Definição das tipologias de edifícios

Como o perfil da demanda de água quente varia de acordo com o número de moradores, foram definidos três diferentes tipos de edifícios como modelo: apartamentos de 2, 3 e 4 dormitórios.

De acordo com a metodologia desenvolvida por RAIMO (2007), considerando uma mesma área construída e prédios de 16 andares, os apartamentos de 4 dormitórios apresentam 2 unidades por andar, enquanto as outras duas tipologias apresentam 4 unidades por andar. CHAGURI (2009 apud LEITE, 2011) realizou pesquisa com projetistas de edifícios da cidade de São Paulo onde se verificou que se adota como critério para a definição do número de pessoas que residem em um apartamento o número de quartos mais uma pessoa. Assim, a tabela 2 resume as características de cada uma das tipologias definidas.

Tabela 2: Características das tipologias definidas (LEITE, 2011)

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Nº de andares	16	16	16
Nº de dormitórios por apartamento	2	3	4
Nº de apartamentos por	4	4	2

andar			
Nº de pessoas por apartamento	3	4	5
Nº total de apartamentos	64	64	32
Nº total de pessoas	192	256	160

Segundo o SECOVI-SP (2013), estas três tipologias representam cerca de 75% dos apartamentos vendidos na cidade de São Paulo no 1º semestre de 2013.

5.2. Demanda de água quente por tipologia

A figura 9 mostra a distribuição do tempo de banho no Brasil, segundo pesquisa realizada pelo PROCEL (2007), a partir da qual foi possível calcular a média de tempo de banho do usuário brasileiro.

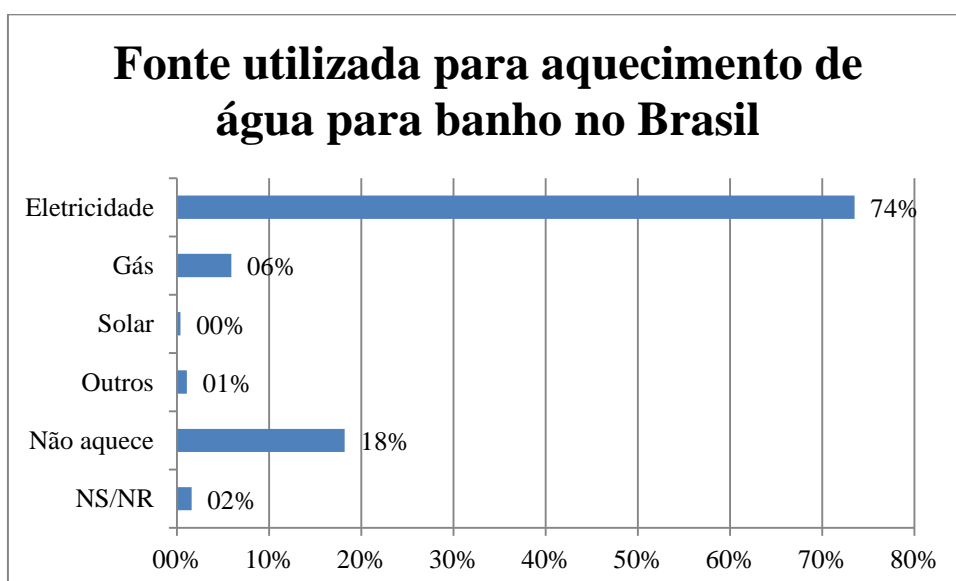


Figura 9: Tempo de banho por pessoa (PROCEL, 2007, apud LEITE, 2011)

$$t = \frac{0,483 \cdot 10 + 0,199 \cdot 15 + 0,04 \cdot 20}{0,483 + 0,199 + 0,04} \approx 12 \text{ minutos}$$

De acordo com recomendação sugerida em Ilha (1991), foi admitido um banho por dia por usuário e vazão de água quente de 3,84 l/min. Dessa forma, tem-se que o consumo diário por usuário é:

$$\forall = 12 \cdot 3,84 = 46,1 \text{ l/dia}$$

Assim, para as tipologias adotadas, o resumo dos resultados da demanda acumulada total diária de água quente é apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Demanda diária de água quente por tipo de edifício

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Demanda total (l)	8851	11802	7376
Demanda por unidade (l)	138,3	184,4	230,5

Admitindo que esta demanda esteja concentrada igualmente em dois intervalos nos horários de pico de demanda de energia elétrica, entre 5h e 9h e entre 17h e 21h, e que o consumo nas duas horas centrais de cada intervalo seja 50% maior em relação à primeira e a última horas, (LEITE, 2011) obteve os gráficos das figuras 10, 11 e 12 de distribuição do consumo de água quente ao longo do dia por tipologia de edifício definida.



Figura 10: Demanda de água quente ao longo do dia para a Tipologia I (LEITE, 2011)

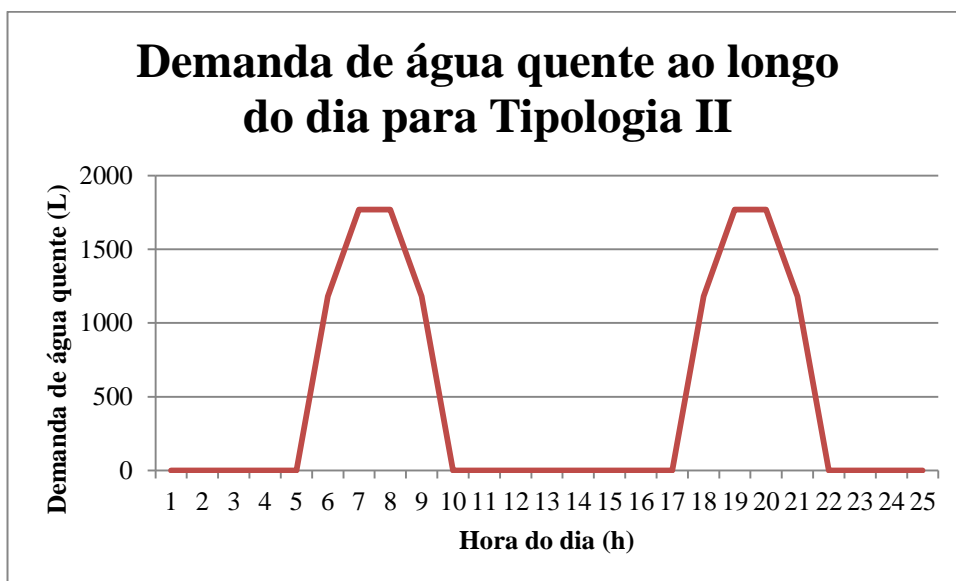


Figura 11: Demanda de água quente ao longo do dia para a Tipologia II (LEITE, 2011)

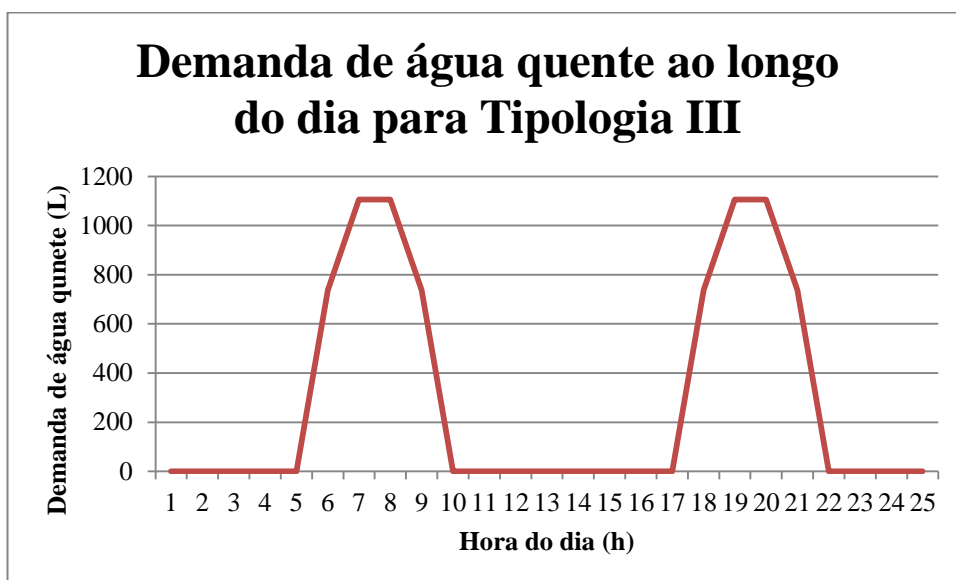


Figura 12: Demanda de água quente ao longo do dia para a Tipologia III (LEITE, 2011)

6. Definição da configuração do sistema

Neste capítulo, será definida a configuração do Sistema de Aquecimento a ser projetado. Assim, serão definidos os seguintes aspectos:

- Tipo de coletor solar a ser instalado;
- Forma de associação entre coletores e bomba de calor;
- Local da instalação;
- Sistema de recirculação de água;
- Sistema de medição de consumo;

6.1. Critérios de seleção

Os critérios adotados para seleção da configuração a ser implementada foram:

- Desempenho: leva em consideração o aproveitamento energético da solução a ser implementada;
- Custos: leva em consideração os custos de aquisição e instalação de equipamentos, além de custos de manutenção e operação;
- Disponibilidade no mercado brasileiro: leva em consideração a disponibilidade da solução no mercado brasileiro, o que está associado diretamente ao custo da alternativa para o cliente.

6.2. Avaliação das soluções

6.2.1 Tipo de coletor solar

Em relação ao tipo de coletor solar, serão adotados coletores solares de placa plana tendo em vista os seguintes aspectos:

1. Custo significativamente menor, como já apresentado na tabela 1;
2. Maior eficiência quando considerada a área total ocupada pelo coletor e não apenas a área absorvedora, como pode ser visto na figura 13.

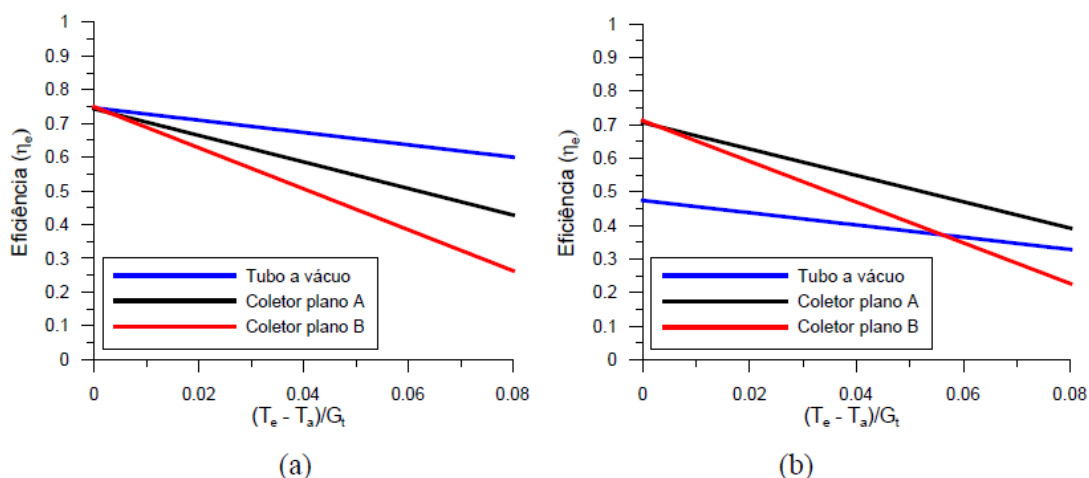


Figura 13: Gráfico de eficiência comparada de coletores. a) Utilizando área absorvedora b) Utilizando área total (MANEA, 2012)

A figura 13 mostra a comparação da eficiência de dois tipos de coletores planos ("A" e "B", que custam R\$ 1300,00 e R\$ 700,00, respectivamente), obtidos a partir de tabela do INMETRO, com um coletor tubular a vácuo (que custa R\$ 1500,00), ensaiado por MANEA et al (2011). Na figura 13.a, a eficiência é calculada levando-se em consideração apenas a superfície absorvedora e na figura 13.b, ela é calculada tomando a área total ocupada pelo coletor. O gráfico relaciona a eficiência com a diferença entre a temperatura de entrada do fluido de trabalho (T_e) e a temperatura ambiente (T_a), fator que está associado às perdas térmicas de calor útil para o meio.

Pela análise da figura 13.b, pode-se notar que os coletores planos apresentam melhor desempenho em boa parte da comparação.

6.2.2 Forma de associação entre coletores solares e bomba de calor

Em relação à forma de associação entre bombas de calor e coletores solares, existem três diferentes formas de associação, como já apresentadas no item 4.2:

1. Associação em série: o coletor solar fornece calor no evaporador, substituindo evaporadores tradicionais que trocam calor com o ar externo;
2. Associação em paralelo: o coletor solar é utilizado para aquecer diretamente o tanque e a bomba convencional a ar é acionada apenas de forma complementar;
3. Associação “*dual source*”: bomba de calor operando com dois evaporadores, um a ar e outro alimentado de calor advindo do coletor solar;

De acordo com os estudos apresentados por LAZZARIN (2012) (vide figura 14), as duas melhores alternativas em termos de aproveitamento da energia advinda do ar e do sol, são: a associação “*dual source*” e a associação em paralelo. Ambas apresentaram um desempenho superior para qualquer área de coletor, em comparação com a bomba de calor convencional com condensador a ar e os sistemas exclusivamente solares de aquecimento de água.

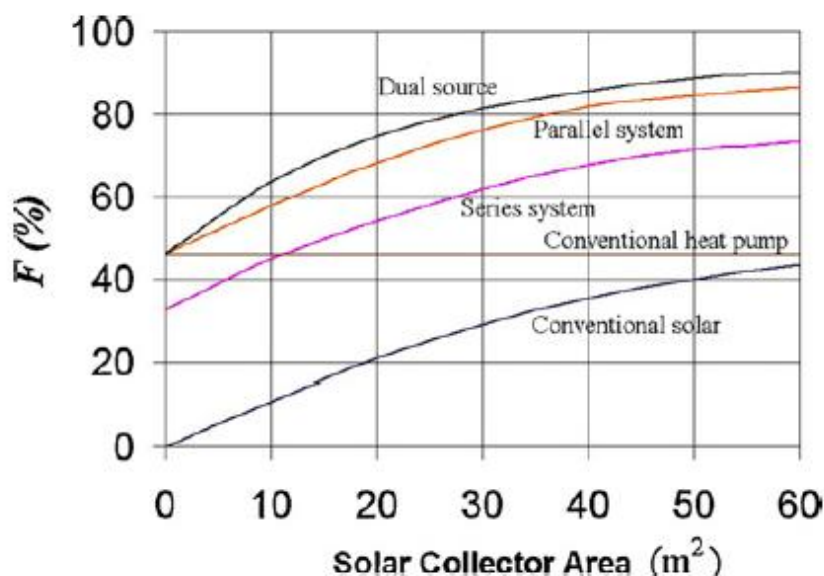


Figura 14: Fração de energia gratuita em relação ao consumo total de energia X área dos coletores solares (LAZZARIN, 2012)

Analisando a figura 14, nota-se também que a diferença de desempenho entre as duas melhores alternativas não ultrapassa 10% e tende a se estabilizar à medida em que aumenta a radiação absorvida com o aumento da área coletora. Já a diferença em relação à configuração em série é significativamente mais alta, o que levou ao descarte desta solução.

Como a alternativa “*dual source*” é mais complexa do ponto de vista técnico que a configuração em paralelo e, portanto, mais cara, tornou-se necessária realizar uma análise de custo-benefício. Para tal, foram tomados os dados climáticos de Vicenza, na Itália, a cerca de 40 km de Pádua, região onde Lazzarin (2012) realizou o seu estudo, e comparados com os dados climáticos de São Paulo, ambos apresentados no Anexo A. Em posse dessas informações, notou-se que a média anual de radiação solar em São Paulo é significativamente maior do que a média anual em Vicenza. Além disso, em São Paulo, a queda de radiação incidente no inverno não é tão acentuada quanto na Itália, portanto o ganho de desempenho proporcionado não justifica os custos adicionais para instalação de uma associação mais complexa e cara.

Assim, a alternativa escolhida para este projeto foi a configuração em paralelo entre bombas de calor de ar convencionais e coletores solares de placa plana, na qual os dois equipamentos aquecem diretamente o reservatório de água quente.

6.2.3 Local de instalação

Tendo em vista o interesse em reduzir as perdas de energia ao longo da tubulação e o consumo de energia no bombeamento, optou-se pela instalação de todos os componentes do sistema de aquecimento (coletores, bomba de calor, reservatório de água quente e bomba de circulação) na cobertura do prédio, já que para um edifício padrão, não há como prever a existência de outros espaços com pouco sombreamento para a instalação dos coletores solares. Assim, vale a ressalva de que esta configuração impõe esforços extras sobre a estrutura do prédio, que devem ser levados em conta no projeto civil.

6.2.4 Sistema de medição de consumo

Serão utilizados dois medidores de consumo por unidade habitacional. Um hidrômetro medirá o consumo de água quente e o outro medirá o consumo de água fria, uma solução técnica bastante adotada no mercado para este tipo de configuração.

6.3. Layout da Configuração adotada

A figura 15 apresenta um layout da configuração adotada. Vale ressaltar que devido às grandes demandas do sistema, serão utilizados dois reservatórios térmicos para todas as tipologias, e que a bomba de calor está acoplada apenas ao segundo reservatório, aquecendo diretamente a água que vai para o consumidor final.

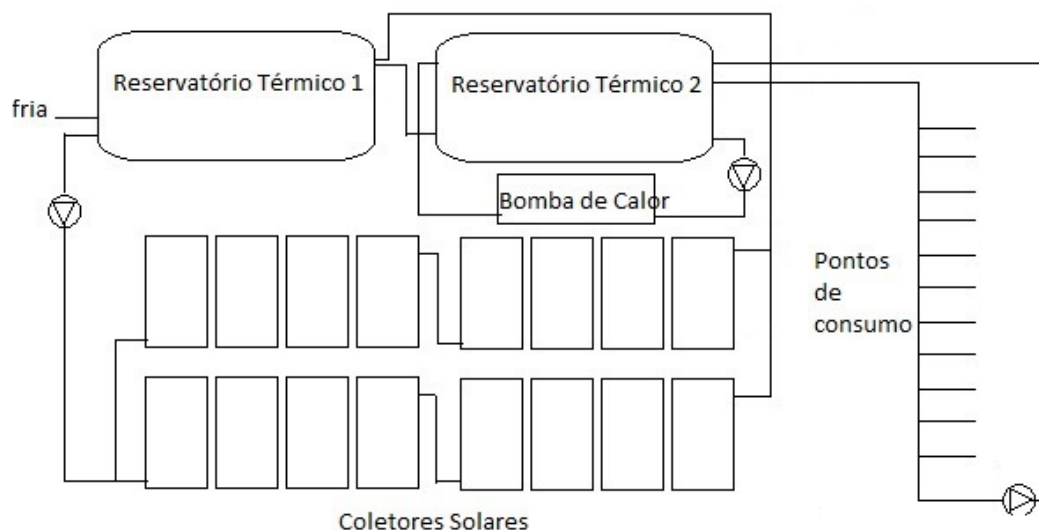


Figura 15: Configuração adotada

7. Dimensionamento do Sistema de Aquecimento

7.1. Metodologia

O dimensionamento de um sistema de aquecimento solar pode ser dividido em duas partes: o dimensionamento do circuito primário, formado pelas fontes de calor (no caso, coletores solares e bomba de calor) e o reservatório térmico; e o dimensionamento do circuito secundário, que leva água do reservatório até os pontos de consumo.

No que tange ao dimensionamento do circuito primário, diversas metodologias foram desenvolvidas e este projeto seguiu a metodologia desenvolvida pela ABRAVA, em parceria com a ABRASIP e a ABRINSTAL, que foi elaborada para residências multifamiliares, com base nas exigências da Lei municipal nº 14.459 da cidade de São Paulo e nas Normas ABNT NBR 15569 e ABNT NBT 7198, e segue os seguintes passos:

1. Definição da demanda de água quente por unidade habitacional (realizado no item 5);
2. Dimensionamento do reservatório de água quente;
3. Cálculo das energias útil e total consumida;
4. Cálculo da produção de energia do coletor solar;
5. Cálculo da área de captação, número de coletores e área de instalação;
6. Dimensionamento da bomba de calor;
7. Seleção da bomba de circulação do circuito primário;
8. Dimensionamento da tubulação do circuito primário;

Em relação ao dimensionamento do circuito secundário, foi realizado o dimensionamento da tubulação e da bomba de circulação.

Este procedimento será realizado para cada tipologia e, por fim, os custos de operação e instalação do sistema integrado serão comparados com os custos do sistema composto apenas por bomba de calor.

7.2. Hipóteses

Para fins de dimensionamento, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Regime permanente;
- Propriedades constantes: Densidade da água (ρ) = 1000 kg/m³ e Calor específico (C_p) da água = 4,18 kJ/kg.K;
- Temperatura do reservatório (T_r): 50°C;
- Temperatura de consumo (T_c): 40°C;
- Temperatura da água de alimentação (T_a): 20,2°C (recomendada pela norma ABNT NBR 14.459);
- Temperatura do ar (T_{atm}): 14°C;
- A inclinação do coletor é dada pela latitude da cidade de São Paulo + 10°, portanto, vale 33°;

7.3. Dimensionamento do circuito primário

Reservatório de água quente

A norma ABNT NBR 15.569 (ABNT, 2008) sugere que o volume do reservatório de água quente seja dado pela equação (1), recomendando que seja respeitado o limite inferior de 75% da demanda diária de água quente.

$$V_{arm} = \frac{V \times (T_c - T_a)}{T_r - T_a} \geq 75\% \times V \quad (1)$$

Onde:

V_{arm} = Volume do reservatório de água quente m³ ;

V = Demanda diária de água quente [m³];

Energia útil requerida pelo sistema

A energia útil ($E_{útil}$, em KWh/dia) necessária para aquecimento da água é dada pela eq. (2):

$$E_{útil} = \frac{F_{ocup} \times V_{arm} \times \rho \times C_p \times T_c - T_a}{3600} \quad (2)$$

Onde:

F_{ocup} = Fator de ocupação, dado pela tabela 4;

ρ = Densidade da água [Kg/m³];

Tabela 4: Fator de ocupação em função do número de unidades (ABRAVA et al)

Nº de unidades habitacionais	Fator de ocupação
Até 9 unidades	1
De 10 a 19	0,9
De 20 a 39	0,8
40 ou mais	0,7

O fator de ocupação existe pelo fato de o consumo de água quente não acontecer em todas as unidades simultaneamente. Assim, ele estabelece parâmetros para a ocupação de edifícios residenciais de acordo com o número de unidades ABRAVA et al (2013).

Energia total requerida pelo sistema

A energia total requerida pelo sistema é dada pela soma da energia útil com as perdas térmicas. A Norma ABNT NBR 15.569 (ABNT, 2008) recomenda admitir 15% de perdas térmicas nos circuitos primário e secundário. Portanto:

$$E_{total} = E_{util} + E_{perdas} = 1,15 \times E_{util} \quad (\text{kWh/dia}) \quad (3)$$

Produção média de energia necessária

A produção média mensal necessária de energia pelos coletores solares para aquecimento da água, em kWh/mês, é dada pela equação (4):

$$PMME = 30 \times E_{total} \times F_o \times F_s \quad (4)$$

Onde:

$PMME$ = Produção média mensal de energia (kWh/mês)

F_o = Fator de orientação em relação ao norte geográfico, dado na tabela 5.

F_s = Fração Solar desejada para a instalação;

Tabela 5: Fator de orientação em função do desvio do norte geográfico (ABRAVA et al, 2013)

Desvio do norte geográfico	Fator de orientação
De 0° a 30°	1
De 31° a 60°	1,13
De 61° a 90°	1,16

Neste projeto, será adotado que o desvio do norte geográfico não ultrapassará 30°.

Produção média de energia por coletor

A Norma ABNT NBR 15569 (ABNT, 2008) determina que a produção média diária de energia específica por coletor (PME), em kWh/m², seja calculado pela equação (5):

$$PME = 4,901 \times (F_R \tau \alpha - 0,0249 \times F_R U_L) \quad (5)$$

Onde:

PME = Produção média diária de energia específica (kWh/m².dia);

$F_R \tau \alpha$ = Coeficiente global de ganho do coletor;

$F_R U_L$ = Coeficiente global de perdas do coletor;

Em tabelas de comparação de coletores, como a do Programa Brasileiro de Etiquetagem (INMETRO, 2014), é possível obter valores confiáveis para a produção média mensal de energia para diversos modelos de coletores disponíveis no mercado brasileiro.

A Lei 14.459 determina que os valores de Produção média mensal de energia obtidos na tabela do INMETRO para qualquer coletor solar no município de São Paulo devem ser atualizados por um fator de correção, tendo em vista às condições climáticas da cidade. Esta correção está expressa na equação (6).

$$PME_{SP} = 0,65 \times PME_{INMETRO} \quad (6)$$

Determinação da Área da instalação

Assim, conhecendo a produção média de energia necessária e a produção de energia por coletor, determina-se a área de absorção dos coletores pela equação (7).

$$A_{abs} = \frac{PMME}{PME_{SP}} \quad (7)$$

E o número de coletores (n) então é dado pela equação (8):

$$n = \frac{A_{abs}}{A_c} \quad (8)$$

Onde A_c é a área de um coletor solar.

Devido à necessidade de um espaçamento adequado entre os coletores para evitar sombreamento de uma placa sobre outra, a área efetiva ocupada pela instalação é significativamente superior à área total de captação propriamente dita. ABRVA et al (2013) recomenda utilizar um fator de correção 1,6.

$$A_{efetiva} = 1,6 \cdot A_{total} \quad (9)$$

Resultados do Aquecimento Solar

A tabela 6 retoma informações importantes das tipologias I, II e III.

Tabela 6: Características das tipologias

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Número de unidades	64	64	32
Número de dormitórios por unidade	2	3	4
Número de usuários por unidade	3	4	5
Demanda diária por unidade (l)	138,3	184,4	230,5
Demanda diária total (l)	8851	11801,6	7376

A tabela 7 apresenta os resultados obtidos para os volumes mínimos de reservatório para cada tipologia e a alternativa selecionada dentre as disponíveis no mercado. Foi preciso optar por mais de um reservatório em todas as tipologias, tendo em vista a dificuldade em encontrar modelos de grande porte.

Tabela 7: Tamanho dos reservatórios selecionados por tipologia

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Volume mínimo (l)	6639	8851	5532
Reservatórios	1 de 3000 litros 1 de 4000 litros	1 de 4000 litros 1 de 5000 litros	2 de 3000 litros
Fabricante	Jellyfish		

Os coletores solares inscritos no Programa Brasileiro de Etiquetagem (INMETRO, 2014) foram avaliados e o coletor solar selecionado para este projeto foi o modelo RSC1400, da marca RINNAI.

Utilizando o equacionamento sugerido, inicialmente o sistema foi dimensionado para 40%, percentual mínimo de fração solar exigido em lei para a cidade de São Paulo, para que fosse avaliada a área total de instalação necessária. Como os resultados se mostraram viáveis sob o ponto de vista de área disponível em edifícios deste porte, a fração solar foi alterada para 60%, percentual que a literatura indica trazer o melhor retorno sobre investimento. A tabela 8 apresenta os resultados obtidos para esta fração solar.

Tabela 8: Resultados dos Sistemas de Aquecimento Solar por tipologia

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
E_{util} (kWh/dia)	142,4	189,9	118,7
E_{perdas} (kWh/dia)	21,4	28,5	17,8

E_{total} (kWh/dia)	163,8	218,4	136,5
PMME (kWh/mês)	3440	4586,6	2866,7
A_{abs} (m ²)	56	70	45
A_{total} (m ²)	90	112	72
Número de coletores	40	50	32

Dimensionamento da Bomba de Calor

A bomba de calor foi dimensionada para atender a toda a demanda de energia necessária ao sistema, pois assim ela já serve de *backup* para as situações que o sistema solar de aquecimento não atenda o fornecimento de energia determinado.

A tabela 9 apresenta os resultados do dimensionamento dos sistemas auxiliares de cada tipologia, maiores detalhes técnicos constam no Apêndice.

Tabela 9: Resultados do dimensionamento dos sistemas auxiliares por tipologia

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Capacidade mínima da Bomba de Calor (Kcal/h)	6997	8996	5997
Fabricante	Jellyfish	Jellyfish	Jellyfish
Modelo	BC-80 HOT 55	BC-120 HOT 55	BC-80 HOT 55
Capacidade (Kcal/h) ¹	13950	18465	13950
Produção (l/h) ²	558	739	558

¹ Capacidade considerando $T_{atm} = 18^{\circ}\text{C}$, temperatura média anual em São Paulo;

² Produção de água a 50°C , considerando $T_{atm} = 18^{\circ}\text{C}$, temperatura média anual em São Paulo.

Seleção da bomba de circulação do circuito primário

Para determinação da moto-bomba a ser utilizada no circuito primário, é preciso conhecer a vazão e altura manométrica neste circuito.

A vazão é definida em função da área coletora total e de seu arranjo físico (associações em série e/ou em paralelo), determinando assim o diâmetro da tubulação principal e a potência da moto-bomba a ser utilizada.

Na associação em série, a moto-bomba bombeia água apenas para o primeiro coletor e a água circula de coletor em coletor até j retornar ao reservatório. Na associação em série, a bomba deve ser capaz de prover a mesma vazão para todos os coletores, requerendo portanto uma maior vazão da moto-bomba.

De acordo com a norma ABNT NBR 15.747-2 (ABNT, 2012), o coletor solar para aplicação banho é ensaiado com uma vazão de 72 l/h.m^2 para obter sua eficiência instantânea. Assim, ABRVA et al (2013) recomenda a utilização desta vazão no circuito primário, de tal modo que a vazão da bomba seja determinada pela equação 10:

$$Q = \frac{72 \times A}{N_{\text{séries}} + 1} \quad (10)$$

Onde:

Q: Vazão (litros/hora);

$N_{\text{séries}}$: número de associações em série;

A: área coletora total (m²)

Em relação a perda de carga, o fabricante TIGRE fornece a perda de carga por metro de tubulação para a linha Aquatherm®, específica para tubulações de água quente, em função da vazão e do diâmetro da tubulação. A tabela fornecida consta no Apêndice C.

A tabela 10 apresenta as configurações adotadas e bombas selecionadas para cada tipologia. O número de coletores associados em série foi determinando respeitando critério especificado no Catálogo do Fabricante.

Tabela 10: Configuração e bomba de circulação do circuito primário por tipologia

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Associações em série	4 (4 linhas de 10 coletores)	5 (5 linhas de 10 coletores)	4 (4 linhas de 8 coletores)
Bomba selecionada	Schneider BPR-9	Schneider BPR-12	Schneider BPR-9

Dimensionamento da tubulação do circuito primário

De posse da vazão no circuito primário, a determinação do diâmetro da tubulação é feito de modo que a máxima velocidade obtida atenda à Norma ABNT NBR 7198 (ABNT, 1993) que define a velocidade máxima, pressão máxima e pressão mínima a serem utilizadas em uma tubulação, respectivamente:

$$V_{\text{max}} = 3,0 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad P_{\text{max}} = 400 \text{ kPa} = 40,8 \text{ m. c. a.} \quad P_{\text{min}} = 5 \text{ kPa} = 0,51 \text{ m. c. a.}$$

Como a vazão e a velocidade se relacionam pela equação 11, determinou-se o diâmetro D da tubulação de modo que a máxima velocidade obtida atendesse a norma.

$$Q = V \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (11)$$

Assim, adotou-se uma tubulação de 11,8 mm de diâmetro interno da linha Aquatherm® no circuito primário.

7.4 Dimensionamento do circuito secundário

No circuito secundário, os parâmetros importantes a serem determinados são:

- Dimensionamento da tubulação na saída do reservatório e nos pontos de consumo;
- Vazão do sistema de recirculação;
- Seleção da bomba de circulação;

Dimensionamento da tubulação do circuito secundário

De modo análogo ao realizado na determinação do diâmetro da tubulação no circuito primário, utilizou-se a eq. (11) para determinar o diâmetro da tubulação de acordo com a máxima vazão possível, de modo que a velocidade máxima esteja abaixo da determinada na Norma ABNT NBR 7198 (ABNT, 1993). A figura 16 apresenta um desenho esquemático da distribuição de água quente no circuito secundário e os valores dos diâmetros internos obtidos.

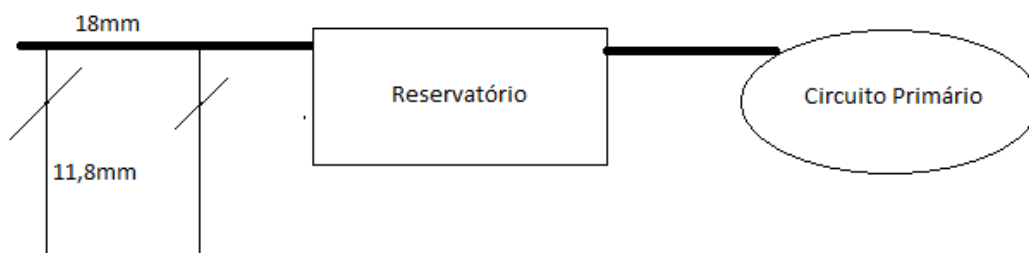


Figura 16: Representação esquemática do sistema de distribuição de água quente

Sistema de recirculação de água

Em sistemas de grande porte, a utilização de um sistema de recirculação de água quente tem como objetivo reduzir o desperdício devido ao tempo de espera do usuário para ter água na temperatura desejada durante o banho. A vazão mássica de recirculação, em kg/s, deve ser tal que compense as perdas térmicas ao longo da tubulação e é calculada pela eq. (12):

$$m_{recirc} = \frac{q_{tub}}{c_p \cdot dT_{tub}} \quad (12)$$

Onde:

- q_{tub} : perda de calor ao longo da tubulação, em kJ;

- dT_{tub} : diferença de temperatura admissível entre primeiro e último andar, em °C;

Como a Norma ABNT NBR 15.569 (ABNT, 2008) recomenda considerar 15% de perdas térmicas, admitindo uma diferença de temperatura entre os dois pontos de consumo mais distantes entre si na ordem de 5°C, obtém-se os valores de vazão de recirculação para cada tipologia apresentados na tabela 11.

Tabela 11: Vazão de recirculação por tipologia

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Vazão de recirculação (m³/h)	0,122	0,156	0,104

Seleção da bomba de circulação

A seleção da bomba de circulação do circuito secundário foi feita de maneira análoga à seleção da bomba de circulação do circuito primário, calculando a vazão pelo perfil de demanda de cada tipologia acrescida à vazão de recirculação e altura manométrica total. A tabela 12 apresenta as bombas selecionadas para cada tipologia.

Tabela 12: Bombas de circulação por tipologia

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Fabricante	Schneider	Schneider	Schneider
Modelo	BT4-0507E9 (0,75 cv)	BT4-1015E11 (1,5 cv)	VJ-05 (0,5 cv)

Sistema de automação e controle

Para garantir que o SAS maximizará a utilização de energia solar, faz-se necessário a aquisição de um sistema de automação que controle a circulação de água nos ramos de aquecimento solar e auxiliar, bem como ligue e desligue a bomba de calor. Este sistema é amplamente conhecido como Controlador liga-desliga. Para este projeto, foi selecionado o controlador MDX do fabricante Tholz. Este controlador apresenta 3 sensores acoplados, que são instalados na saída do reservatório, na saída do coletor solar e na saída do sistema auxiliar, para acompanhar a temperatura em cada trecho e realizar a ação de controle a partir de um diferencial de temperatura entre os pontos, que pode ser configurável. O controlador também possui um Timer, que permite configurar horários nos quais o sistema de aquecimento deve estar desligado, economizando energia nos horários de baixa demanda, como durante a madrugada.

Confiabilidade do sistema

Uma desvantagem de um SAS com bomba de calor como sistema auxiliar de aquecimento é a confiabilidade do sistema em regiões onde a temperatura atinge níveis menores do que 14°C. Nessas situações, o desempenho da bomba de calor é muito prejudicado, aumentando o risco de que a demanda de água quente não seja atendida. Deste modo, para garantir a confiabilidade integral do sistema, foi incluído neste projeto a utilização de uma resistência elétrica acoplada no reservatório térmico, que será acionada pelo sistema de automação apenas quando a bomba de calor não for capaz de elevar a temperatura do reservatório à condição desejada. No mercado, existem diversas soluções disponíveis de reservatórios térmicos de grande porte com resistências elétricas que chegam a potências de 15 kW para esta finalidade.

8. Análise econômica

8.1 Custos de instalação

Por meio de contato com fornecedores, foram levantados os custos dos equipamentos necessários à instalação, conforme especificado na seção 7. A tabela 13 consolida todos os custos de instalação levantados.

Tabela 13: Custos de instalação

	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
Coletores solares	R\$ 13.400,00	R\$ 16.750,00	R\$ 10.720,00
Bomba de calor	R\$ 12.100,00	R\$ 16.500,00	R\$ 12.100,00
Bombas de circulação	R\$ 1.405,20	R\$ 1.651,83	R\$ 1.107,97
Reservatórios	R\$ 45.109,00	R\$ 50.927,40	R\$ 42.698,00
Controlador	R\$ 3.300,00	R\$ 3.300,00	R\$ 3.300,00
Tubulação	R\$ 266,10	R\$ 266,10	R\$ 300,90
Custo total	R\$ 75.580,30	R\$ 89.395,33	R\$ 70.226,87
Custo por unidade habitacional	R\$ 1.180,95	R\$ 1.396,80	R\$ 2.194,60

8.2 Custos de operação

Os custos de operação do sistema são compostos principalmente pelo custo de energia elétrica da operação das bombas de circulação e da bomba de calor. Foi desconsiderado o custo de operação relativo à utilização da resistência elétrica dos reservatórios, que será utilizada apenas em situações emergenciais de falha da bomba de calor. Vale destacar que foi adotada uma curva de COP aproximada para obter o consumo real da bomba de calor, dado que ela opera a 60% da sua capacidade nominal no Sistema de aquecimento solar.

A tabela 14 apresenta o custo de operação obtido a partir do preço da energia elétrica para consumo residencial na cidade de São Paulo, indicado pela ANEEL

(2014), para o Sistema de Aquecimento Solar projetado e para um sistema utilizando apenas bomba de calor.

Tabela 14: Custo anual de operação (em R\$)

Custo anual de operação	Tipologia I	Tipologia II	Tipologia III
SAS	R\$ 4.319,80	R\$ 6.694,97	R\$ 3.378,15
Apenas Bomba de calor	R\$ 8.016,40	R\$ 11.327,94	R\$ 6.441,18

8.2 Tempo de Retorno sobre o investimento

Para comparar a viabilidade econômica do projeto em comparação com o projeto de um sistema que utiliza apenas bomba de calor, adotou-se o método de *payback*. Admitindo que as tarifas de energia elétrica serão reajustadas pela inflação, os resultados para as três tipologias são apresentados na tabela 15.

Tabela 15: Tempo de retorno sobre investimento

Tipologia	Tempo de Retorno
I	4,6 anos
II	3,5 anos
III	4,7 anos

Pode-se notar que o tempo de retorno do investimento é considerado bom sob a perspectiva econômica para todas as três tipologias.

Próximos passos

Para encerrar este projeto, a última etapa será a avaliação do tempo de retorno sobre o investimento do sistema de aquecimento solar em comparação com a alternativa que utiliza chuveiros elétricos, que é a prática comum no mercado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7198: Projeto e execução de instalações prediais de água quente**. Brasília, 1993, 6p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação**. Brasília, 2008, 42p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15747-2: Sistemas térmicos e seus componentes – Coletores solares, parte 2: Métodos de ensaio**. Brasília, 2009, 22p.

ABRAVA – Associação brasileira de refrigeração, ar condicionado, ventilação e aquecimento; ABRINSTAL - Associação Brasileira pela conformidade e eficiência de instalações; ABRASIP – Associação Brasileira de Sistemas Prediais. **Guia de parametrização da Lei Solar de São Paulo**. São Paulo. Disponível em: <http://www.dasolabrava.org.br/informacoes-2/projeto/>. Acesso em 21 de Março de 2014.

ABRAVA – Associação brasileira de refrigeração, ar condicionado, ventilação e aquecimento; GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit PROCOBRE – Instituto Brasileiro de Cobre. **Projetando Sistemas de Aquecimento Solar para Habitações multifamiliares**. São Paulo, 1ª edição. 2013. 132p.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA **Atlas de energia elétrica do Brasil – 1ª edição**, 2002. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf Acesso em: 03 de Setembro de 2013.

CHAN, A.L.S; LIN, Z.; CHOW, T.T; FONG, K. F. **Potential application of a centralized solar water-heating system for a high-rise residential building in Hong Kong**. Applied Energy, vol. 83, 2005. 13p.

CHAGURI JUNIOR, J. J. **Sistemas prediais de aquecimento de água a gás: parâmetros de dimensionamento e gerenciamento**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2009. 104p.

COMGÁS – Companhia de Gás de São Paulo; ABRINSTAL – Associação Brasileira pela conformidade e eficiência de instalações. **Sistemas de Aquecimento de Água para edifícios através da associação de energia solar e gás natural – Manual técnico para Projeto e Construção de sistemas de aquecimento solar e gás natural**. São Paulo, 2011. 61p.

FERRARI, E. L. **Utilização de Curvas de Carga de Consumidores Residenciais, Medidas para Determinação de Diversidade da Carga e Carregamento de Transformadores de Distribuição.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1996. 140p.

FRETIN, D.; BRUNA, G. C. **A lei da Energia Solar em São Paulo – Análise e comentários.** Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Presbiteriana Mackenzie. 7º Seminário Internacional do NUTAU-USP, São Paulo, 2008. 8p.

ILHA, M. S. O.; **Estudo de parâmetros relacionados com a utilização de água quente em edifícios residenciais.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991. 60p.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Programa Brasileiro de Etiquetagem. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-banho.pdf>. Acesso em 20 de Março de 2014.

JELLYFISH. Bombas de Calor – Hot55/70 (Banho). Disponível em: <http://jellyfish.com.br/produtos/produtos-bombas-de-calor/produto-hot-55-70-banho/> Acesso em 28 de Maio de 2014.

KAYGUSUZ, K., AYHAN, T., **Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating.** Energy Conversion and Management, vol. 40, 1999. 20p.

LAZZARIN, R. M. **Dual source heat pump systems: Operations and performance.** Energy and Buildings, vol. 52, 2012. 9p.

LEITE, T. L. da S., **Avaliação de sistemas de aquecimento de água.** Trabalho de Conclusão de Curso. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2011. 65 p.

MANEA, T. F., **Desenvolvimento de uma bancada para ensaios de coletores solares de tubos de vidro a vácuo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012. 60 p.

MANEA, T. F.; KRENZINGER, A.; PERIN, A. L.; ROSA, F. N da; **Determinação de parâmetros de desempenho para coletores solares tubulares a vácuo**. Anais do XX Simpósio Peruano de Energia Solar. Porto Alegre, 2011. 10p.

NEVES, J. C. M.. **Avaliação técnico-econômica de um aquecedor solar de água com coletor de tubos a vácuo na cidade de Cascavel-PR**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2013. 41p.

PROCEL – **Programa Nacional de Conservação de Energia elétrica. Pesquisa de Posse de Equipamento e Hábitos de Uso – Ano de base 2005: Classe Residencial, Relatório Brasil**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em <http://www.eletrobras.com/pci/main.asp?ViewID={A84BD56D-D750-477C-8E20-2BF2D94B4EE2}>. Acesso em 03 de Setembro de 2013.

PROCOBRE – Instituto Brasileiro do Cobre. **Qualidade em instalações de aquecimento solar – Boas práticas**. São Paulo, 2009. 44p.

RAIMO, P. A.; **Aquecimento de Água no Setor Residencial**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-graduação da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007. 125p.

REDPATH, D. A. G. et al. **Experimental investigation of fluid flow regime in thermosyphon heat-pipe evacuated tube solar heat heaters**. Anais da Conference on Passive and Low Energy Architecture. Dublin, 2008. 15p.

ROSA, F.N. **Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012. 51p.

SECOVI-SP - SINDICATO DAS EMPRESAS DE COMPRA, VENDA,

| LOCAÇÃO E ADMINISTRAÇÃO DE IMÓVEIS RESIDENCIAIS E COMERCIAIS DE SÃO PAULO. **Pesquisa do Mercado Imobiliário**, São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.secovi.com.br/files/Arquivos/balancomercado2-2013.pdf> Acesso em 30 de Outubro de 2013.

SOLARES-ONLINE. Disponível em: <http://www.solares-online.com.br/index.php?codpagina=00016264>. Acesso em 10 de Setembro de 2013.

SOLETROL **Aquecedores Solares de Água. Como funciona um aquecedor solar.** Disponível em: <http://www.soletrol.com.br/educacional/comofunciona.php> Acesso em 05 de Setembro de 2013.

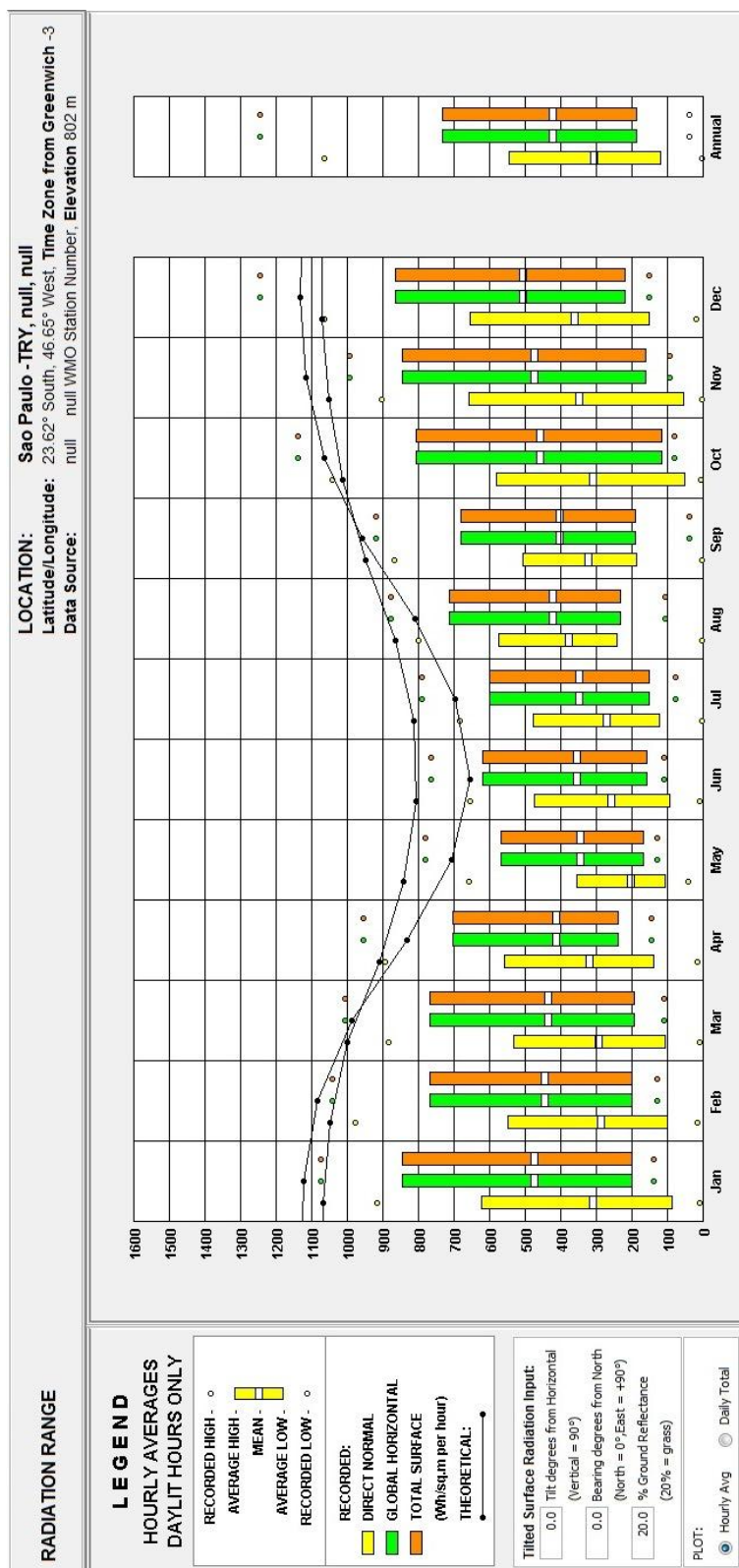
STARKE A., COLLE S., CARDEMIL J.M, **Simulação de sistema de aquecimento de piscina através de uma bomba de calor dual-source assistida por energia solar.** Anais do XV Congresso Ibérico y X Congresso Ibero-americano de Energia Solar, 2012.

TIGRE. Linha Aquatherm®. Disponível em: <http://www.redebras.com.br/cpvc-aquatherm/cpvc-aquatherm.pdf>. Acesso em 27 de Maio de 2014.

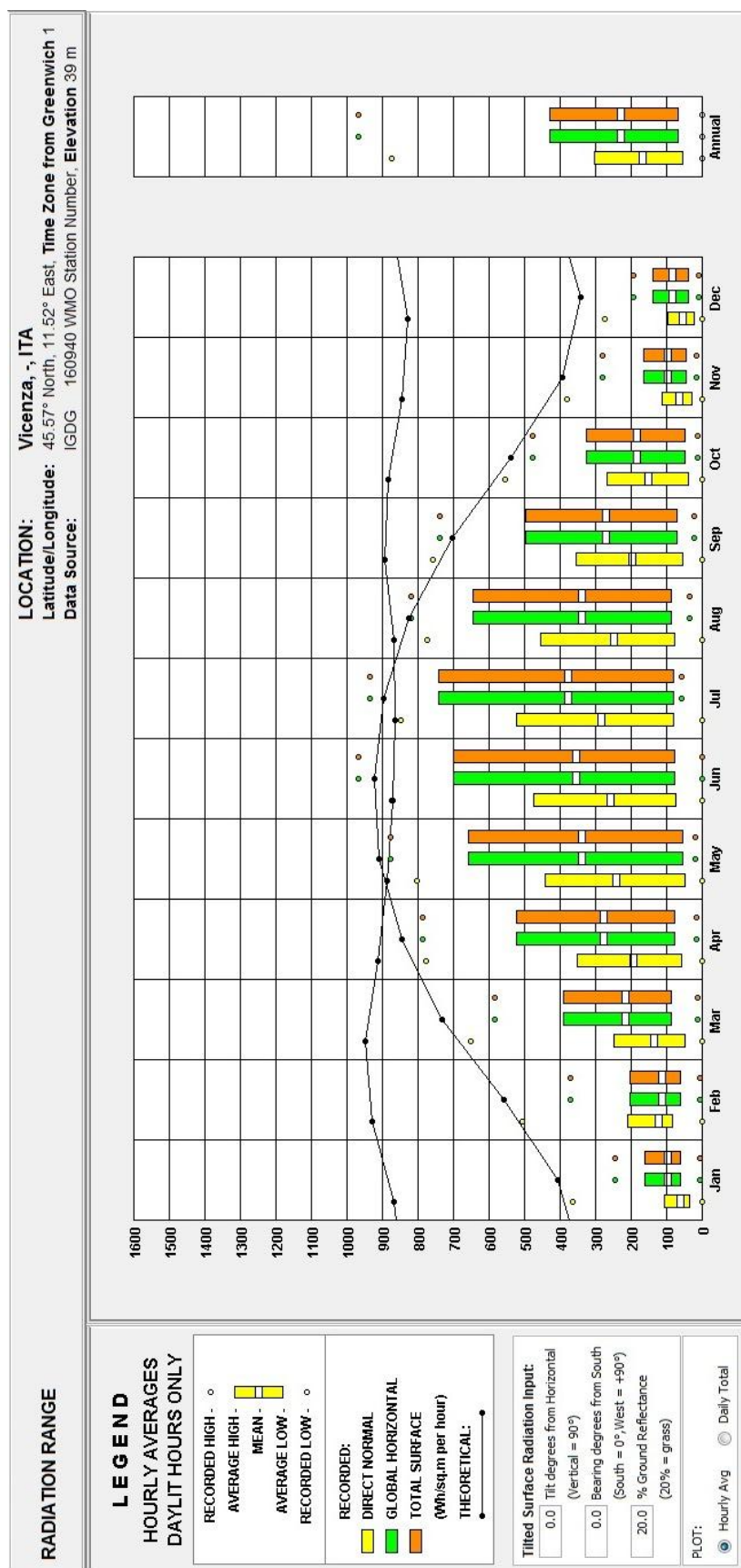
WOLF, D.; TAMIR, A.; KUDISH, A. **A central solar domestic hot water system. Performance and economic analysis.** Energy Conversion & Management. Atenas, 2000.

APÊNDICE A – Dados climáticos de Vicenza (Itália) e São Paulo (Brasil)

- São Paulo:



- Vicenza:



APÊNDICE B – Dados técnicos: Bombas de Calor

Fonte: Jellyfish. Catálogo técnico da linha HOT 55/70

Disponível em: <http://jellyfish.com.br/produtos/produtos-bombas-de-calor/produto-hot-55-70-banho/>

Acesso em 28/05/2014.

PRODUÇÃO EM LITROS - HOT 55												
Temperatura do Ar (°C)	14			18			22			27		
Temperatura da Água (°C)	45	50	55	45	50	55	45	50	55	45	50	55
BC 50	369	295	246	434	347	290	499	399	333	581	464	387
BC 80	608	486	405	698	558	465	788	630	525	900	720	600
BC 120	804	643	536	923	739	616	1042	834	695	1191	953	794
BC 480	3402	2722	2268	3822	3057	2548	4241	3393	2827	4765	3812	3177
PRODUÇÃO EM LITROS - HOT 70												
Temperatura do Ar (°C)	14			18			22			27		
Temperatura da Água (°C)	60	65	70	60	65	70	60	65	70	60	65	70
BC 120	486	425	378	529	463	411	543	475	422	594	520	462
CAPACIDADE EM KILOCALORIAS												
Temperatura do Ar (°C)	14			18			22			27		
BC 50	7385			8685			9986			11612		
BC 80	12150			13950			15750			18000		
BC 120	16083			18465			20848			23826		
BC 480	68047			76434			84821			95304		
BC 120 HOT 70	17000			18500			19000			20800		
CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	BC 50 M		BC 80 T		BC 120 T		BC 480 T		BC 120 T HOT 70		
Fases		230-1-60		230-3-60		230-3-60		230-3-60		230-3-60		
Capacidade Nominal	Kcal	11.612		18.723		23.826		95.304		21.622		
Potência Compressor	Kw	3.12		4.27		16.7		16.7		24.9		
Corrente Compressor	A	14.6		12.6		22		22		12.6		
Qtde Compressores	Un	1		1		1		4		1		
Potência Ventilador	Kw	0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		
Corrente Ventilador	A	1.5		1.5		1.5		1.5		1.5		
Qtde Ventiladores	Un.	1		1		1		6		1		
Potência Nominal Total	Kw	3.27		4.42		5.55		5.55		8.35		
Corrente Nominal Total	A	16.1		14.1		18.2		18.2		26.4		
C.O.P. Água Quente		3.78		3.61		3.72		3.72		3.00		
Comprimento	mm	765		965		965		2030		965		
Largura	mm	665		855		855		2445		855		
Altura	mm	770		770		970		2525		970		
Peso	Kg	70		102		139		998		152		
Vazão Água Quente	M³/h	3		4		5		64		5		

APÊNDICE C – Perda de carga na tubulação

Fonte: Tigre. Catálogo técnico da linha Aquatherm®

Disponível em: <http://www.redebras.com.br/cpvc-aquatherm/cpvc-aquatherm.pdf>.

Acesso em 27/05/2014.



Tabela 7 - Perda de carga em tubulações de CPVC

Vazão (m³/s)	Vazão l/s	15 V (m/s)	1/2" PL (m.c.a./m)	22 V (m/s)	3/4" PL (m.c.a./m)	28 V (m/s)	1" PL (m.c.a./m)	35 V (m/s)	1 1/4" PL (m.c.a./m)	42 V (m/s)	1 1/2" PL (m.c.a./m)	54 V (m/s)	2" PL (m.c.a./m)	73 V (m/s)	2 1/2" PL (m.c.a./m)	89 V (m/s)	3" PL (m.c.a./m)	114 V (m/s)	4" PL (m.c.a./m)
0,00005	0,05	0,46	0,027	0,20	0,003	0,12	0,001	0,08	0,000	0,06	0,000	0,03	0,000	0,02	0,000	0,01	0,000	0,01	0,000
0,00010	0,10	0,91	0,098	0,39	0,013	0,24	0,004	0,16	0,001	0,11	0,001	0,07	0,000	0,04	0,000	0,02	0,000	0,01	0,000
0,00015	0,15	1,37	0,207	0,59	0,027	0,36	0,008	0,24	0,003	0,17	0,001	0,10	0,000	0,05	0,000	0,04	0,000	0,02	0,000
0,00020	0,20	1,83	0,353	0,79	0,045	0,48	0,014	0,31	0,005	0,22	0,002	0,13	0,001	0,07	0,000	0,05	0,000	0,03	0,000
0,00030	0,30	2,74	0,748	1,18	0,096	0,72	0,029	0,47	0,010	0,34	0,005	0,20	0,001	0,11	0,000	0,07	0,000	0,04	0,000
0,00040	0,40	3,66	1,274	1,57	0,163	0,96	0,049	0,63	0,017	0,45	0,008	0,26	0,002	0,14	0,000	0,10	0,000	0,060	0,000
0,00050	0,50	4,57	1,925	1,96	0,246	1,20	0,075	0,78	0,026	0,56	0,012	0,33	0,003	0,18	0,001	0,12	0,000	0,07	0,000
0,00060	0,60	5,49	2,697	2,36	0,345	1,44	0,105	0,94	0,037	0,67	0,016	0,39	0,004	0,21	0,001	0,14	0,000	0,09	0,000
0,00070	0,70			2,75	0,459	1,68	0,139	1,10	0,049	0,78	0,022	0,46	0,006	0,25	0,001	0,17	0,000	0,1	0,000
0,00080	0,80			3,14	0,587	1,93	0,178	1,25	0,063	0,90	0,028	0,52	0,007	0,28	0,002	0,19	0,001	0,12	0,000
0,00090	0,90			3,54	0,730	2,17	0,221	1,41	0,078	1,01	0,034	0,59	0,009	0,32	0,002	0,21	0,001	0,13	0,000
0,00100	1,00			3,93	0,887	2,41	0,269	1,57	0,095	1,12	0,042	0,65	0,011	0,35	0,003	0,24	0,001	0,14	0,000
0,00120	1,20			4,72	1,243	2,89	0,377	1,88	0,133	1,35	0,059	0,78	0,016	0,42	0,004	0,29	0,001	0,17	0,000
0,00140	1,40			5,50	1,654	3,37	0,501	2,19	0,176	1,57	0,078	0,91	0,021	0,49	0,005	0,33	0,002	0,20	0,001
0,00160	1,60					3,85	0,642	2,51	0,226	1,79	0,100	1,04	0,027	0,56	0,006	0,380	0,002	0,230	0,001
0,00180	1,80					4,33	0,798	2,82	0,281	2,02	0,124	1,17	0,033	0,63	0,007	0,43	0,003	0,26	0,001
0,00200	2,00					4,81	0,970	3,14	0,341	2,24	0,151	1,30	0,040	0,71	0,009	0,48	0,003	0,29	0,001
0,00220	2,20					5,30	1,157	3,45	0,407	2,47	0,180	1,43	0,048	0,78	0,011	0,52	0,004	0,32	0,001
0,00240	2,40							3,76	0,478	2,69	0,211	1,56	0,056	0,85	0,013	0,57	0,005	0,35	0,001
0,00260	2,60							4,08	0,554	3,91	0,245	1,69	0,065	0,92	0,015	0,62	0,006	0,37	0,002
0,00280	2,80							4,39	0,636	3,14	0,281	1,82	0,075	0,99	0,017	0,67	0,006	0,40	0,002
0,00300	3,00							4,70	0,723	3,36	0,319	1,96	0,085	1,06	0,019	0,71	0,007	0,43	0,002
0,00325	3,25							5,09	0,838	3,64	0,370	2,12	0,099	1,15	0,022	0,77	0,008	0,47	0,003
0,00350	3,50							5,49	0,961	3,92	0,425	2,28	0,113	1,23	0,025	0,83	0,010	0,50	0,003
0,00375	3,75									4,2	0,483	2,44	0,139	1,32	0,029	0,89	0,011	0,54	0,003
0,00400	4,00									4,48	0,544	2,61	0,145	1,4	0,033	0,95	0,012	0,58	0,004

V: velocidade da água [m/s]

PL: perda de carga [m.c.a./m]