

DANIEL DA SILVA TAVEIRA

ANÁLISE DO USO DE BOMBA DE CALOR UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR

SÃO PAULO

2014

DANIEL DA SILVA TAVEIRA

ANÁLISE DO USO DE BOMBA DE CALOR UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

SÃO PAULO

2014

DANIEL DA SILVA TAVEIRA

ANÁLISE DO USO DE BOMBA DE CALOR UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração:

Bomba de Calor, Energia Solar Térmica

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Roberto de Freitas Pacheco

SÃO PAULO

2014

Taveira, Daniel da Silva

**Análise do uso de bomba de calor utilizando a energia solar
/ D.S. Taveira. – São Paulo, 2014.
62 p.**

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia solar 2.Bomba de calor I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

Dedico este trabalho a minha família, pela compreensão e apoio, em especial a minha noiva, Natália, pela dedicação e incentivo ao longo do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do curso, pela experiência e dedicação na transmissão dos conhecimentos.

Aos colegas, por toda a ajuda e amizades desenvolvidas neste período.

Ao professor Dr. Cláudio Pacheco, pela orientação e amizade durante a escolha e desenvolvimento do tema desta monografia.

“We are like tenant farmers chopping down the fence around our house for fuel when we should be using nature’s inexhaustible sources of energy – sun, wind and tide... I’d put my money on the sun and solar energy. What a source of power! I hope we don’t have to wait until oil and coal run out before we tackle that.”

(Thomas A. Edison, em conversa com Henry Ford e Harvey Firestone, em 1931).

RESUMO

O objetivo deste documento foi de analisar a influência da temperatura de evaporação de uma bomba de calor sobre o coeficiente de performance e observar os resultados práticos em uma instalação real. Conforme observado em alguns estudos, com o aumento da temperatura de evaporação de um ciclo de compressão de vapor, eleva significativamente o coeficiente de performance do equipamento. Ao aplicar este conceito em uma instalação, o aumento da performance do equipamento deve reduzir custos de operação e potência instalada. Para mensurar esta redução e analisar a viabilidade econômica desta aplicação no Brasil, o objeto de estudo foi o Instituto de Medicina e Reabilitação Física do Hospital das Clínicas, da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo e da Rede Lucy Montoro, localizado na cidade de São Paulo. Foram propostos arranjos usando bombas de calor que utilizam ar no evaporador e as que utilizam água quente que provém de um sistema solar térmico. Também foi proposto um arranjo que utiliza a energia solar de maneira direta e bombas de calor como fonte auxiliar. Estes arranjos são para uma possível substituição do sistema atual, que utiliza chuveiros elétricos nos vestiários e uma bomba de calor antiga para aquecer a piscina. Ao simular a operação dos arranjos foi observada uma economia anual em todos os cenários, sendo mais expressiva no arranjo que utiliza a energia solar diretamente para atender a demanda térmica. O sistema que usa bombas de calor com água quente no evaporador mostra um melhor rendimento ao longo do ano. Porém, como o investimento inicial é muito mais alto que nos outros sistemas, sua aplicação é inviável economicamente, não apresentando retorno do capital investido. Conclui-se que a melhor opção é pelo uso da energia solar com apoio de bombas de calor, e não o inverso.

Palavras-chave: Bomba de calor. Coeficiente de performance. Energia Solar.

ABSTRACT

The objective of this paper was to analyze the influence of the evaporation temperature of a heat pump over the coefficient of performance and to observe the practical results in a real facility. As according to some studies, with the increase of evaporation temperature of a vapor compression cycle, there is a significant increase in the coefficient of the equipment's performance. By applying this concept in a facility, the increase of the performance of the equipment must reduce costs of operating and installed power. To measure this reduction and analyze the economic viability of this application in Brazil, the subject of the study was the Instituto de Medicina e Reabilitação Física do Hospital das Clínicas, da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo e da Rede Lucy Montoro, in the city of Sao Paulo. It was proposed arrays using heat pumps that use air in the evaporator and using hot water that comes from a solar thermal system. It was also proposed an array that uses solar energy directly and heat pump as an auxiliary source. These arrangements are for possible substitution of the current system, which uses electric showers in the lockers rooms and an old heat pump to heat the pool. While simulating the operation of the arrangements, an annual saving was observed in all scenarios, being more expressive in the arrangement that uses solar energy directly to serve the thermal demand. The system uses heat pump hot water in the evaporator shows better performance over the year. However, as the initial investment is much higher than in other systems, its application isn't economically viable, showing no return of invested capital. It was concluded that the best option is the use of solar energy with the help of heat pumps, and not the reverse.

Keywords: Heat pump. Coefficient of performance. Solar energy.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema básico de um ciclo de refrigeração e diagrama $T \times s$.	18
Figura 2.2 – Esquema básico de um ciclo frigorífico e diagrama $T \times s$ real.	20
Figura 2.3 – Mapa da Radiação solar global horizontal média anual.	25
Figura 2.4 – Temperaturas Máximas e Mínimas na cidade de São Paulo no ano de 2013.	26
Figura 2.5 – Variação do COP' para as temperaturas mostradas na Figura 2.4.	26
Figura 2.6 – Combinação em paralelo da bomba de calor com coletores solares.	27
Figura 2.7 – Combinação em série da bomba de calor com coletores solares.	28
Figura 2.8 – Elevação do COP' em função da temperatura do evaporador de uma bomba de calor.	29
Figura 2.9 – Comportamento da curva no caso limite.	30
Figura 3.1 – Perfil Energético: Curvas de Consumo e Produção de água quente.	32
Figura 3.2 – Curva de consumo e produção de água quente e perfil de energia do reservatório térmico.	34
Figura 3.3 – Produção de água quente com energia solar e bomba de calor para banho.	36
Figura 3.4 – Curva da produção total de água quente, consumo e do reservatório térmico para banho.	37
Figura 3.5 – Produção de água quente com energia solar e bomba de calor para piscina.	38
Figura 3.6 – Curva de produção total de água quente, demanda térmica e energia acumulada na piscina.	39
Figura 3.7 – Curvas de consumo e produção de água quente e perfil de energia do reservatório térmico.	40

LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 – Aplicações de bombas de calor na indústria	23
Tabela 3.1 – Características Técnicas da Bomba de Calor selecionada	33
Tabela 3.2 – Características Técnicas do Reservatório Térmico selecionado	33
Tabela 3.3 – Características técnicas do coletor solar para banho selecionado	35
Tabela 3.4 – Características Técnicas do Reservatório Térmico selecionado	35
Tabela 3.5 – Características técnicas do coletor solar para piscina selecionado	36
Tabela 3.6 – Características Técnicas da Bomba de Calor selecionada	38
Tabela 3.7 – Dados Técnicos da bomba de calor selecionada	40
Tabela 3.8 – Dados Técnicos do reservatório térmico selecionado	41
Tabela 3.9 – Características técnicas do coletor solar para banho selecionado	42
Tabela 3.10 – Características Técnicas do Reservatório Térmico selecionado	43
Tabela 4.1 – Horas de funcionamento de cada bomba de calor	44
Tabela 4.2 – Horas de funcionamento do equipamento e fração solar - banho	49
Tabela 4.3 – Horas de funcionamento do equipamento e fração solar - piscina	51
Tabela 4.4 - Comparação do uso de eletricidade e gás natural como energia auxiliar	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{coletora}	Área de coletores solares	[m ²]
$C_{A,BC}$	Custo total anual de energia para operar as bombas de calor	[R\$/ano]
$C_{A,BCex}$	Custo anual de energia elétrica consumida pela bomba de calor existente	[R\$/ano]
$C_{A,Ch}$	Custo anual da energia consumida pelos chuveiros elétricos	[R\$/ano]
COP	Coeficiente de Performance – Máquina frigorífica	[-]
COP'	Coeficiente de Performance da Bomba de Calor	[-]
c_p	Calor específico	[kWh/(kg·°C)]
$E_{C,BC}$	Energia consumida pelas bombas de calor no ano	[kWh/ano]
$E_{C,BCex}$	Energia consumida pela bomba de calor existente no ano	[kWh/ano]
$E_{C,BCexFP}$	Energia consumida pela bomba de calor existente fora do horário de ponta	[kWh/ano]
$E_{C,BCexP}$	Energia consumida pela bomba de calor existente no ano durante o horário de ponta	[kWh/ano]
$E_{C,BCFP}$	Energia consumida pela bomba de calor no ano fora do horário de ponta	[kWh/ano]
$E_{C,BCP}$	Energia consumida pela bomba de calor no ano durante o horário de ponta	[kWh/ano]
$E_{C,Ch}$	Energia consumida pelos chuveiros elétricos no ano	[kWh/ano]
$E_{C,ChFP}$	Energia consumida pelos chuveiros elétricos no ano fora do horário de ponta da distribuidora	[kWh/ano]
$E_{C,ChP}$	Energia consumida pelos chuveiros elétricos no ano durante o horário de ponta da distribuidora	[kWh/ano]
E_{perdas}	Energia térmica perdida nos circuitos hidráulicos	[kWh/dia]
$E_{\text{útil}}$	Energia útil para aquecimento	[kWh/dia]
FC_{instal}	Fator de Correção da Instalação em relação a inclinação e desvio do norte geográfico	[-]
f_{pu}	Frequência de uso do chuveiro	[-]
F_{RU_L}	Fator de perdas do coletor solar	[-]

$F_{R\tau\alpha}$	Fator de ganho do coletor solar	[-]
I_G	Irradiação global média	[kWh/m ²]
$n^{\circ}_{\text{banhos}}$	Número diário de banhos	[-]
n°_{dias}	Número de dias no ano	[-]
n°_{horas}	Número de horas de funcionamento das bombas de calor no ano	[-]
P_a	Pressão atmosférica local	[kPa]
$P_{C,BC}$	Potência do compressor das bombas de calor	[kW]
$P_{C,BCex}$	Potência do compressor da bomba de calor existente	[kW]
P_{Ch}	Potência elétrica do chuveiro	[kW]
PMDEE	Produção específica de energia térmica do coletor solar	[kWh/m ²]
q_c	Fluxo de calor perdido por convecção da piscina	[W/m ²]
q_e	Fluxo de calor perdido por evaporação da piscina	[W/m ²]
Q_H	Quantidade de calor rejeitada a alta temperatura	[W]
q_H	Quantidade de calor rejeitada a alta temperatura por unidade de massa	[J/kg]
Q_L	Quantidade de calor retirada do ambiente refrigerado	[W]
q_L	Quantidade de calor retirada do ambiente refrigerado por unidade de massa	[J/kg]
Q_{pu}	Vazão do chuveiro	[m ³ /s]
s	Entropia específica	[J/(kg·K)]
T	Temperatura	[°C]
T_{ambiente}	Temperatura ambiente	[°C]
t_{banho}	Tempo médio de cada banho	[h]
T_{consumo}	Temperatura da água quente de consumo	[°C]
T_E	Tarifa de energia elétrica da distribuidora	[R\$/MWh]
T_{EFP}	Tarifa de energia elétrica da distribuidora fora do horário de ponta	[R\$/MWh]
T_{EP}	Tarifa de energia elétrica da distribuidora no horário de ponta	[R\$/MWh]
T_P	Temperatura da piscina	[°C]
t_{pu}	Tempo de uso do chuveiro	[s]
v	Velocidade do vento na superfície da piscina	[m/s]

$V_{\text{armaz.}}$	Volume armazenado	$[m^3]$
V_{consumo}	Volume de água quente consumido diariamente	$[m^3]$
w_C	Trabalho específico executado pelo compressor	$[J/kg]$
W_C	Trabalho executado pelo compressor	$[W]$
β	Inclinação do coletor solar em relação ao plano horizontal	$[^\circ]$
$\beta_{\text{ótimo}}$	Inclinação ótima do coletor solar em relação ao plano horizontal	$[^\circ]$
γ	Desvio em relação ao norte geográfico	$[^\circ]$
η_{col}	Rendimento do coletor solar	$[-]$
ρ	Massa específica	$[kg/m^3]$
ω_a	Umidade do ar a temperatura ambiente	$\left[\frac{kg_{\text{vapor d'água}}}{kg_{\text{ar seco}}} \right]$
ω_p	Umidade de saturação a temperatura da piscina	$\left[\frac{kg_{\text{vapor d'água}}}{kg_{\text{ar seco}}} \right]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Introdução aos Ciclos Frigoríficos	18
2.1.1	Ciclos Frigoríficos por Compressão de Vapor	18
2.1.2	Fluidos de Trabalho	19
2.1.3	Ciclo Frigorífico Real	20
2.2	Bomba de Calor	20
2.2.1	Condições para elevar o COP' de uma Bomba de Calor.....	21
2.2.2	Aplicações	22
2.3	Energia Solar.....	23
2.4	Uso da Energia Solar para elevar o Coeficiente de Eficácia de uma Bomba de Calor	25
3	COMPONENTES DO SISTEMA E MÉTODOS DE CÁLCULO.....	31
3.1	Estudo de Caso – IMREA Lapa.....	31
3.2	Sistema de aquecimento com Bombas de Calor.....	32
3.3	Sistema Solar Térmico	34
3.4	Sistema Solar Térmico combinado com Bomba de Calor	39
4	RESULTADOS	44
4.1	Sistema com bombas de calor	44
4.1.1	Análise de viabilidade econômica.....	46
4.2	Sistema solar térmico.....	49
4.2.1	Análise de viabilidade econômica.....	52
4.3	Sistema solar combinado com bombas de calor	53
4.3.1	Análise de viabilidade econômica.....	54
4.4	Análise e discussão dos resultados	54
5	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	APÊNDICE – Dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar para Banho e Piscina.....	59
	A.1 – Banho.....	59
	A.2 – Piscina	62

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, termos como eficiência energética e uso racional da energia estão à frente de discussões em universidades, indústria, comércio e serviços, assim como o debate sobre o uso das energias renováveis. Devido ao crescente aumento da demanda por energia elétrica no país e a mudanças nos ciclos hidrológicos, o Brasil tem vivido um período delicado em relação ao abastecimento de energia elétrica. Por depender de um sistema elétrico hidro e térmico, em que a hidroeletricidade pode vir a ser responsável por cerca de 80% da geração de energia dependendo dos níveis dos reservatórios, temas como racionamento de água e energia estão na pauta da imprensa, empresários e representantes partidários.

Mesmo com a crescente necessidade de economia de energia, independentemente do período hidrológico ruim, não há iniciativas para incentivar o uso de sistemas mais eficientes. Algumas poucas organizações independentes com recursos estrangeiros tentam disseminar essa ideia na sociedade. Sistemas como aquecedores solares já são economicamente viáveis no Brasil por contar com grande desenvolvimento da indústria nacional, mas sua participação no mercado é pequena. Os sistemas fotovoltaicos, por serem importados, ainda dependem de um investimento um pouco maior e estão expostos a variação cambial, levando a não opção pelos consumidores por este sistema, apesar de já serem economicamente viáveis e gerar energia elétrica a um custo menor do que qualquer distribuidora do país.

Outro sistema pouco difundido no Brasil é o aquecimento por bombas de calor. Países como Estados Unidos, Canadá e União Europeia utilizam bombas de calor em larga escala para aquecimento de ambiente, água para uso doméstico e para processos industriais. No Brasil, o uso da bomba de calor é observado em pequena escala, principalmente no aquecimento de piscinas. O uso de bombas de calor é justificado pela economia de energia elétrica ou combustível primário pelo fato de produzir um efeito de aquecimento maior que o trabalho consumido.

Como o desempenho da bomba de calor está associado às condições ambientais, há grande variação do coeficiente de performance ao longo do ano, principalmente em regiões com inverno rigoroso. Pensando em melhores condições do coeficiente de performance da bomba de calor, este trabalho tem por objetivo analisar a associação de um aquecedor solar com uma bomba de calor e seu efeito

sobre o coeficiente de performance da bomba de calor, bem como os potenciais econômicos desta associação.

Muitos estudos analisam o uso da energia solar térmica com bomba de calor como fonte auxiliar, para períodos de pouca insolação ou à noite. Mas poucos discutem a utilização da energia solar no evaporador da bomba de calor. Essa aplicação deixa a bomba de calor menos sensível a variação térmica do ambiente, além de melhorar a troca térmica, visto que a troca térmica com água é mais eficiente que a troca com o ar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução aos Ciclos Frigoríficos

Um ciclo frigorífico por compressão de vapor transfere energia de uma fonte fria para uma fonte quente, com um consumo de trabalho. Denominam-se máquinas frigoríficas aquelas que realizam a refrigeração de um ambiente ou processos e, bombas de calor aquelas que aquecem um ambiente, água para uso doméstico ou processos.

2.1.1 Ciclos Frigoríficos por Compressão de Vapor

O Ciclo de Refrigeração opera com fluido de trabalho que apresenta mudança de fase no ciclo. A Figura 2.1 apresenta um esquema básico do ciclo de refrigeração e a representação do ciclo num diagrama $T \times s$ (Temperatura x Entropia Específica). O estado 1 é vapor saturado na temperatura do evaporador, equipamento que retira calor do ambiente que se deseja refrigerar. O vapor é aspirado pelo compressor, que eleva a pressão até o estado 2 do diagrama, que corresponde a vapor superaquecido. Com a pressão elevada, inicia-se a troca de calor no condensador a pressão constante, e ao final do processo, no estado 3, tem-se líquido a alta pressão. O líquido entra, então, na válvula de expansão, dispositivo que por meio de um estrangulamento reduz a pressão do líquido, no estado 4, a pressão de entrada no evaporador. No evaporador, inicia-se outra troca de calor a pressão constante, e na sua saída tem-se, novamente, o estado 1, de vapor saturado, completando o ciclo.

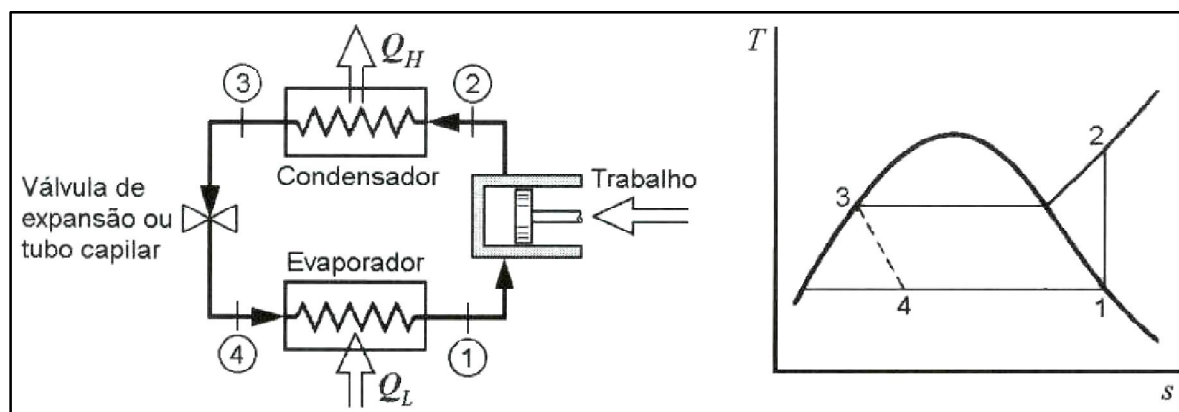


Figura 2.1 – Esquema básico de um ciclo de refrigeração e diagrama $T \times s$.

Fonte: Van Wylen et al. (2003), adaptada.

Segundo Van Wylen et al. (2003), o ciclo apresentado pode ser utilizado em duas situações. A primeira é utiliza-lo como ciclo de refrigeração, com o objetivo de manter um espaço com temperatura inferior a temperatura do meio. A medida do desempenho de um ciclo frigorífico é dada em função do Coeficiente de Performance (COP), coeficiente de eficácia ou coeficiente de desempenho:

$$COP = \frac{q_L}{w_C} \quad (1)$$

Onde:

COP = Coeficiente de Performance do Refrigerador

q_L = Quantidade de calor retirada do espaço refrigerado

w_C = Trabalho executado pelo compressor

A segunda situação é utilizar o ciclo descrito como bomba de calor. Esta situação será abordada mais adiante.

2.1.2 Fluidos de Trabalho

Existe uma grande variedade de fluidos frigoríficos no mercado. No início, as primeiras máquinas frigoríficas utilizavam amônia e dióxido de enxofre, mas por serem tóxicos logo foram substituídos. Recentemente, o fluido mais utilizado era o diclorodifluormetano ($C\ Cl_2\ F_2$), mais conhecido por refrigerante-12 ou R-12. Também chamados de clorofluorcarbonos, são quimicamente estáveis à temperatura ambiente, característica importante para um fluido de trabalho, mas grande vilão do meio ambiente. Devido sua estabilidade, em casos de vazamento para o ambiente, o gás pode atingir a estratosfera, lugar em que a molécula é dissociada, liberando o cloro, que destrói a camada de ozônio. Com isso, houve uma intensa busca de novos substitutos para atuar como fluido de trabalho. Os fluidos de trabalho mais desejáveis são os HFC's, por não apresentar cloro na composição.

Os aspectos mais importantes para seleção o fluido de trabalho são a temperatura de operação e o tipo de equipamento utilizado. Também é importante que o fluido não seja tóxico, não cause corrosão nos equipamentos, seja compatível

com o óleo lubrificante utilizado, tenha alta rigidez dielétrica, boa estabilidade química e disponibilidade comercial a um custo razoável.

2.1.3 Ciclo Frigorífico Real

Como qualquer processo real, o ciclo frigorífico está sujeito a perdas durante os processos de transformação. O projeto de compressores evoluiu bem como dos motores elétricos, mas ainda é impossível realizar um processo de compressão sem atrito. Nas tubulações, as perdas de carga são devido ao escoamento e perdas térmicas para o meio. A utilização de maiores diâmetros e o uso de isolamento térmico reduzem essas perdas, mas elevam o custo da instalação, sendo, portanto, necessário o dimensionamento correto para redução das perdas sem um grande aumento do investimento.

Na Figura 2.2, é possível observar os desvios causados pelas perdas ao longo do ciclo de refrigeração. Nota-se que o estado 1 é vapor superaquecido; o estado 2 pode aumentar ou diminuir a entropia devido a transmissão de calor com o meio durante o processo de compressão, e o estado 5 é líquido sub-resfriado.

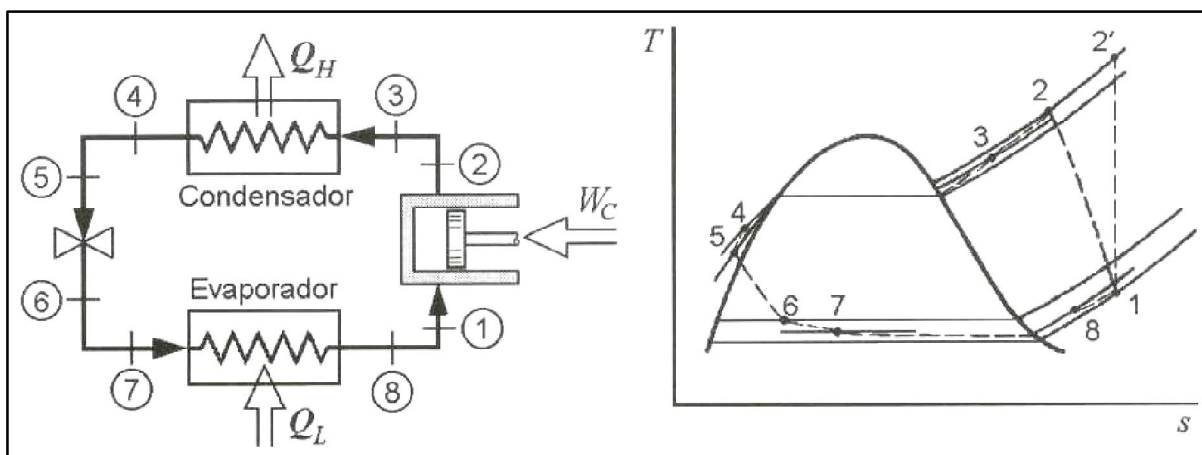


Figura 2.2 – Esquema básico de um ciclo frigorífico e diagrama $T \times s$ real.
Fonte: Van Wylen et al. (2003).

2.2 Bomba de Calor

Segundo Stoecker e Jabardo (2002), os sistemas frigoríficos são, no sentido figurado, bombas de calor, uma vez que removem calor de uma região de baixa temperatura e transferem a outra de alta temperatura. Entretanto, como dito

anteriormente, a denominação de bomba de calor é utilizada para designar ciclos frigoríficos que se pretende aproveitar o calor rejeitado a alta temperatura. Para o tratamento da eficiência de uma bomba de calor, é necessário uma alteração no COP, coeficiente de performance do ciclo de refrigeração, definido pela eq. (1). Como o objetivo da bomba de calor é o aproveitamento do calor rejeitado a alta temperatura, então essa quantidade deve ser usada no numerador do coeficiente de desempenho:

$$COP' = \frac{q_H}{w_C} \quad (2)$$

Onde:

COP' = Coeficiente de Performance da Bomba de Calor

q_H = Quantidade de calor rejeitado a alta temperatura

w_C = Trabalho executado pelo compressor

A relação entre o COP e COP' é descrita a seguir:

$$COP' = \frac{q_H}{w_C} \quad (2)$$

$$q_H = q_L + w_C \quad (3)$$

$$COP' = \frac{q_L + w_C}{w_C} \quad (4)$$

$$COP' = \frac{q_L}{w_C} + 1 \quad (5)$$

$$COP' = COP + 1 \quad (6)$$

2.2.1 Condições para elevar o COP' de uma Bomba de Calor

De acordo com Stoecker e Jabardo (2002), um COP' elevado está relacionado com a redução do trabalho necessário para um dado efeito de aquecimento. O COP' é o resultado da diferença entre a temperatura de entrada e saída da bomba de calor, em que pequenas diferenças resultam em um alto COP' (KJELLSSON, 2009).

Analisando a eq. (3), o trabalho do compressor por ser escrito como a diferença entre q_H e q_L . Substituindo essa relação na eq. (2) temos:

$$COP' = \frac{q_H}{q_H - q_L} \quad (7)$$

De acordo com a eq. (7), pode-se aumentar o COP' aumentando o valor de q_L . Nota-se que o COP' é mais afetado pela elevação de uma unidade em q_L do que por uma redução correspondente de q_H .

A maneira de aumentar o valor de q_L é através da fonte térmica utilizada no evaporador. Para bombas de calor de pequeno porte o modelo mais usado é o que utiliza ar atmosférico como fonte térmica. Portanto, são equipamentos com grande dependência das circunstâncias externas, com grande redução do COP' no inverno, por exemplo.

2.2.2 Aplicações

As aplicações de bombas de calor são amplas. Em residências, pode ser usada para aquecimento de água e do ambiente interno, prática muito utilizada em países frios, como Estados Unidos, Canadá e na Europa. Dado a experiência nessa área, as bombas de calor são utilizadas sempre combinadas com outra fonte de calor, podendo ser geotérmica ou solar com alimentação direta ou indireta.

No Brasil o uso de bombas de calor por consumidores residenciais é pequeno. Por ser um país tropical, há pouca necessidade de aquecimento do ambiente interno das residências. Mas, infelizmente, houve uma popularização muito forte do uso de chuveiros e torneiras elétricas para atender a demanda de água quente. Como já citado, a bomba de calor pode fornecer água quente numa residência com um gasto muito menor de energia, gerando economia na fatura de energia elétrica e reduzindo a demanda do sistema elétrico no horário de pico de consumo.

Na indústria, as bombas de calor podem ser usadas em vários processos. De acordo com o estudo, publicado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos – DOE, a prática mais comum é a secagem de madeira. Além de economizar energia, garante melhor qualidade ao produto final quando comparado com o uso de

fornos. Apesar de numerosas aplicações na secagem de madeira, o tamanho dessas unidades é considerado pequeno. Na indústria, algumas aplicações podem chegar a 1.500 kW. No aquecimento de fluidos, como processos com líquidos ou ar, os valores ultrapassam 5.800 kW.

O mesmo documento mostra uma tabela com as aplicações em vários segmentos industriais, citando outros tipos de bombas de calor utilizadas. Como o objetivo deste estudo é o ciclo de compressão de vapor, a tabela foi adaptada mostrando apenas as aplicações deste ciclo, e é apresentada a seguir.

Tabela 2.1 – Aplicações de bombas de calor na indústria

Indústria	Atividade	Processo
Química	Farmacêutica	Água quente
Produtos de Madeira	Produção de papel	Água quente
	Produção de madeira serrada	Secagem
Alimentos e Bebidas	Produção de alimentos em geral	Água quente para limpeza
	Produção de suco	Concentração de efluente
Diversas	Galvanização	Aquecimento de soluções de processo
	Têxtil	Processo e água quente para limpeza
		Aquecimento de ambiente
		Concentração de efluente
	Produção geral	Processo e água quente para limpeza
		Aquecimento de ambiente
	Distrito de aquecimento	Aquecimento de água e ambientes em larga escala

Fonte: DOE (2003), adaptada.

2.3 Energia Solar

A irradiação solar depende da latitude e da declinação solar e características climáticas e meteorológicas do local ao longo do ano. O seu aproveitamento pode

ser através de energia térmica, por exemplo, em aquecimento de processos industriais e geração de energia elétrica.

Em sua forma mais simples, coletores solares montados nos telhados de residências absorvem o calor e o transmite para água, que fica armazenada num reservatório térmico. Muitos estudos recentes têm o objetivo de analisar o uso da energia solar térmica para processos industriais com o objetivo de redução do consumo de combustíveis. Recentemente, a Pirelli anunciou uma nova fábrica de pneus em Feira de Santana, na Bahia, que utilizará coletores concentradores para geração de vapor utilizado na produção de pneus.

Na geração de energia elétrica, a energia solar pode ser convertida diretamente em energia elétrica, com o uso de painéis fotovoltaicos, nos quais células fotovoltaicas feitas, em geral, de silício, produzem corrente elétrica ao serem expostas a luz e, também, concentrando a energia solar térmica para geração de vapor usado para mover turbinas conectadas a um gerador elétrico, operando segundo o ciclo Rankine de potência a vapor.

Por ter uma posição privilegiada, o Brasil conta com altos índices de irradiação solar ao longo do ano. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a irradiação média diária no país é de 4,8 a 6,0 kWh.m⁻².dia⁻¹.

Apesar disso, o uso da energia solar no Brasil ainda é incipiente. A maioria das aplicações concentra-se no aquecimento de água para uso doméstico. Com a publicação da Resolução Normativa 482, em 17 de abril de 2012, a ANEEL regulamentou a geração distribuída por meio da compensação de energia, sistema conhecido como *net metering*, em que o consumidor instala painéis fotovoltaicos em sua residência e injeta a energia elétrica gerada na rede de distribuição. A energia cobrada pela distribuidora é, em princípio, a diferença entre o consumo da residência e a quantidade de energia injetada pela instalação. Depois de quase dois anos da publicação da resolução, a ANEEL possui registro de apenas 55 instalações residenciais no Brasil, que totalizam quase 1.300 kW de potência instalada. Percebe-se que o potencial de expansão é enorme, mas é preciso políticas públicas eficazes para obtenção de um resultado expressivo.

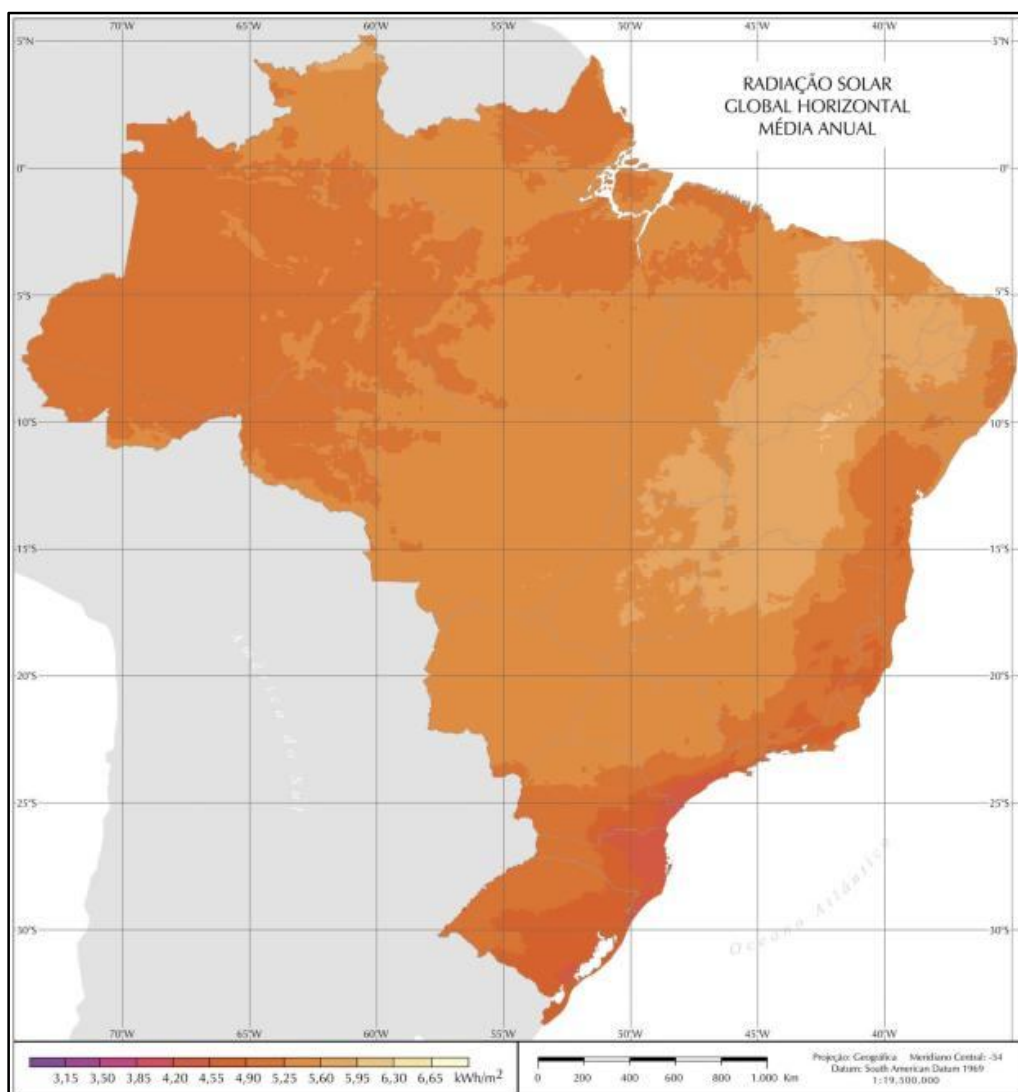


Figura 2.3 – Mapa da Radiação solar global horizontal média anual.
Fonte: Pereira et al. (2006).

2.4 Uso da Energia Solar para elevar o Coeficiente de Eficácia de uma Bomba de Calor

Como já dito anteriormente, o uso de bombas de calor é uma alternativa eficiente para o aquecimento. Combinações de bombas de calor com outras fontes térmicas têm por objetivo melhorar as características das instalações. Uma bomba de calor, na sua forma mais simples, utiliza ar atmosférico como fonte de calor a baixa temperatura, porém, como já discutido, sua operação fica sujeita as condições externas. O COP' da bomba de calor é altamente dependente da temperatura da fonte de calor (SHAHED; HARRISON, 2009).

Citando como exemplo a cidade de São Paulo, a variação da temperatura ao longo do ano é grande. Levantando as temperaturas máximas e mínimas de 1990

até 2013, em que a Figura 2.4 mostra o ano de 2013, os registros são de, respectivamente, 37°C e 0,8°C. Uma bomba de calor convencional, operando entre essas temperaturas, esta sujeita há grande variação de performance ao longo do ano, sendo durante o inverno, o período de menor desempenho, consequentemente, maior consumo de energia.

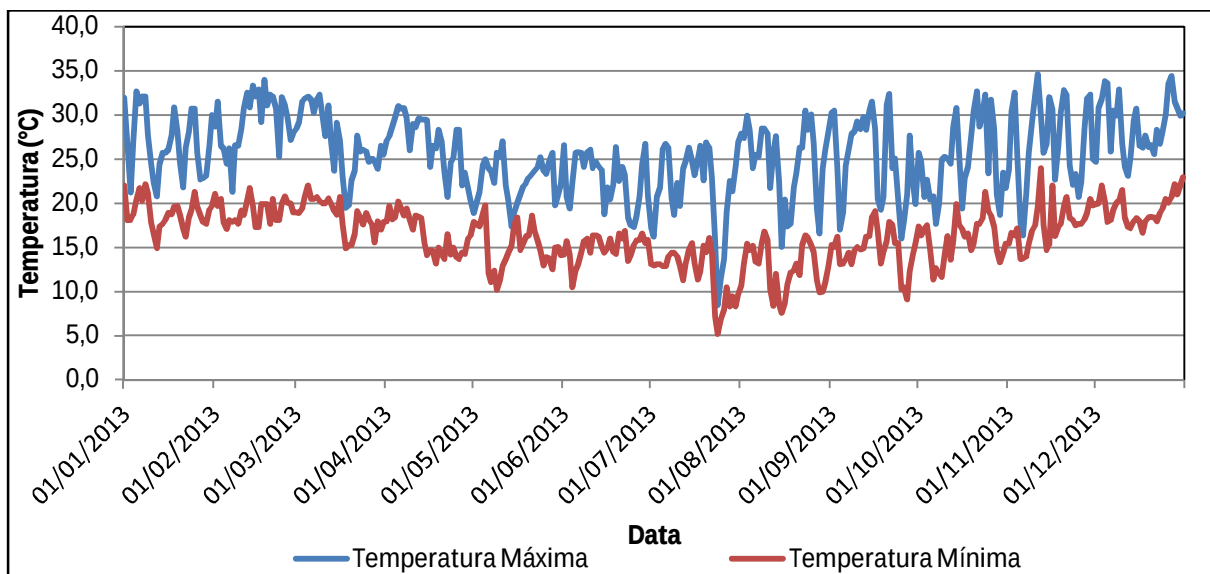


Figura 2.4 – Temperaturas Máximas e Mínimas na cidade de São Paulo no ano de 2013.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as temperaturas mostradas na Figura 2.4, foram analisados os respectivos coeficiente de performance de uma bomba de calor, operando ao longo do ano. Estes valores são mostrados na Figura 2.5.

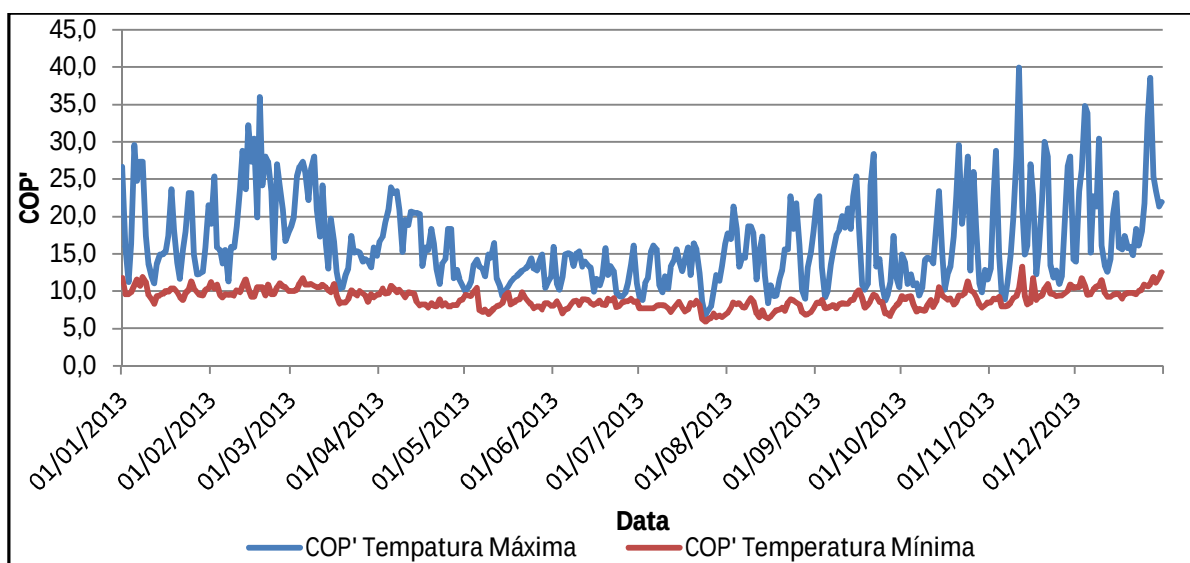


Figura 2.5 – Variação do COP' para as temperaturas mostradas na Figura 2.4.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Várias configurações de sistemas solares térmicos combinados com bomba de calor são possíveis, mas os mais importantes são as ligações em série e em paralelo. Na configuração em paralelo, mostrado na Figura 2.6, os coletores solares atendem a demanda térmica diretamente e a bomba de calor serve como um sistema auxiliar independente para o sistema solar. Na configuração em série, mostrado na Figura 2.7, o sistema solar fornece energia ao evaporador da bomba de calor, com o objetivo de aumentar a temperatura do evaporador e reduzir o consumo de energia. A performance do coletor solar é melhor em baixas temperaturas enquanto a performance da bomba de calor é melhor com altas temperaturas no evaporador. Esta combinação leva a considerar o sistema com ligação em série, no qual o evaporador da bomba de calor recebe energia do coletor solar, aproveitando o melhor de cada sistema (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

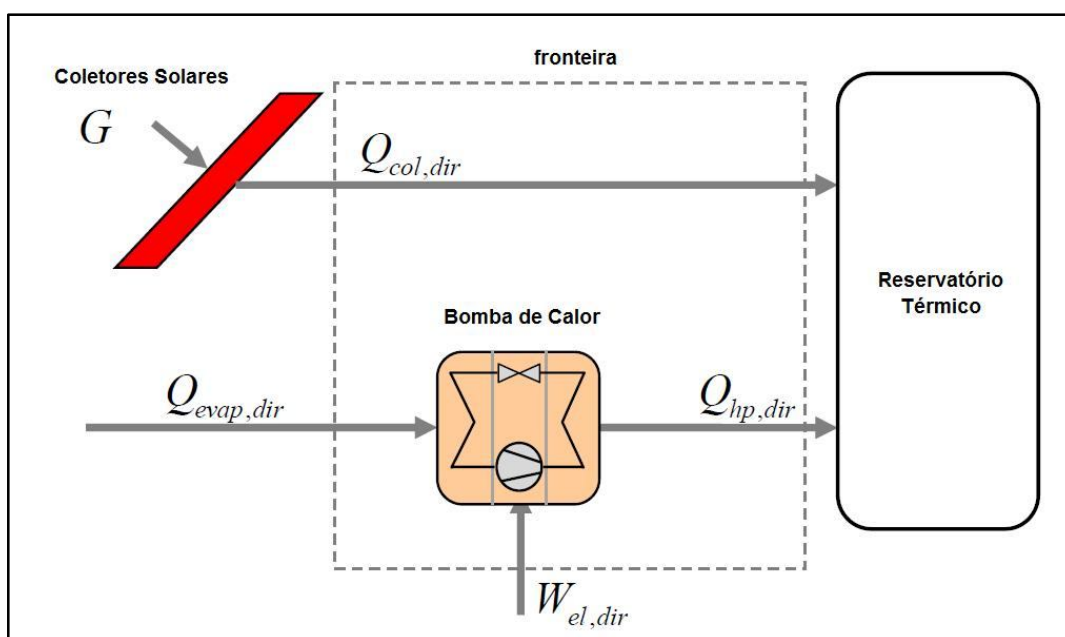


Figura 2.6 – Combinação em paralelo da bomba de calor com coletores solares.

Fonte: Haller e Frank (2011), adaptada.

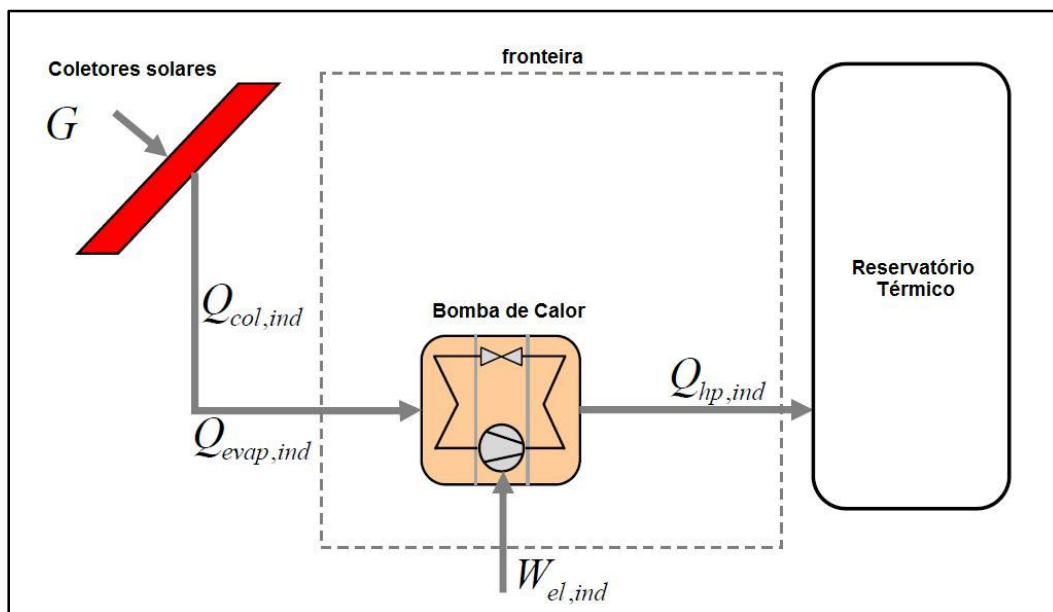


Figura 2.7 – Combinação em série da bomba de calor com coletores solares.

Fonte: Haller e Frank (2011), adaptada.

Este mesmo ponto também foi citado por Haller e Frank (2011), em que alguns sistemas no mercado usam calor de coletores solares não apenas para atendimento direto da carga térmica, mas também indiretamente pela entrega de calor no evaporador da bomba de calor. Usando energia solar térmica no evaporador da bomba de calor em vez de usar o ar ambiente pode-se aumentar o coeficiente de performance da bomba de calor porque o coletor solar entrega energia térmica geralmente numa temperatura mais alta que o ar ambiente. Ao mesmo tempo a eficiência do coletor solar pode ser aumentada neste modo de operação desde que ele opere com a temperatura consideravelmente menor servindo ao evaporador da bomba de calor do que se ele estivesse operando servindo diretamente a temperatura requerida pela carga térmica.

O uso de um sistema de armazenamento térmico também pode ser usado em conjunto com o sistema solar combinado com a bomba de calor para melhorar o coeficiente de performance. Quando a bomba de calor não está em uso, o sistema solar carrega o reservatório. Durante períodos de baixa insolação, o reservatório térmico reduz o consumo de energia da bomba de calor (SHAHED; HARRISON, 2009).

Bombas de calor têm sido usadas nas combinações de sistemas solares em residências e aplicações comerciais. As vantagens são claras, mas isso acarreta em

uma maior complexidade do sistema e a um custo extra que, segundo Kalogirou (2009) são compensados pelo alto coeficiente de performance.

Portanto, conforme exposto, há um consenso de que o aumento da temperatura de evaporação de uma bomba de calor aumenta o desempenho da mesma, gerando economia de energia. Também, ao mudar a fonte térmica do evaporador (de ar atmosférico para água, por exemplo), reduz a amplitude do coeficiente de performance ao longo do ano.

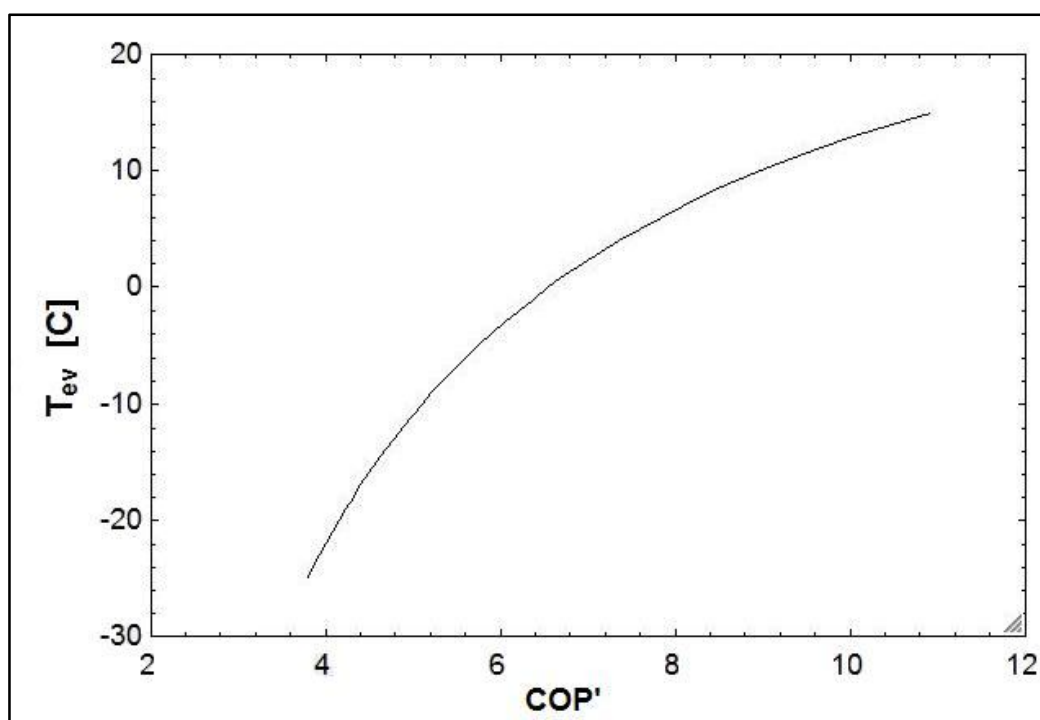


Figura 2.8 – Elevação do COP' em função da temperatura do evaporador de uma bomba de calor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostra a Figura 2.8, com o aumento da temperatura de evaporação no ciclo de uma bomba de calor, consequentemente o coeficiente de performance aumenta, consumindo menos trabalho.

Porém, existe um limite para esse aumento. Teoricamente, ao se atingir a temperatura de condensação, o coeficiente de performance seria máximo e a transferência de calor ocorreria com um trabalho nulo. Como isso é impossível, o comportamento da curva T_{ev} x COP' muda para assintótico, como mostra a Figura 2.9.

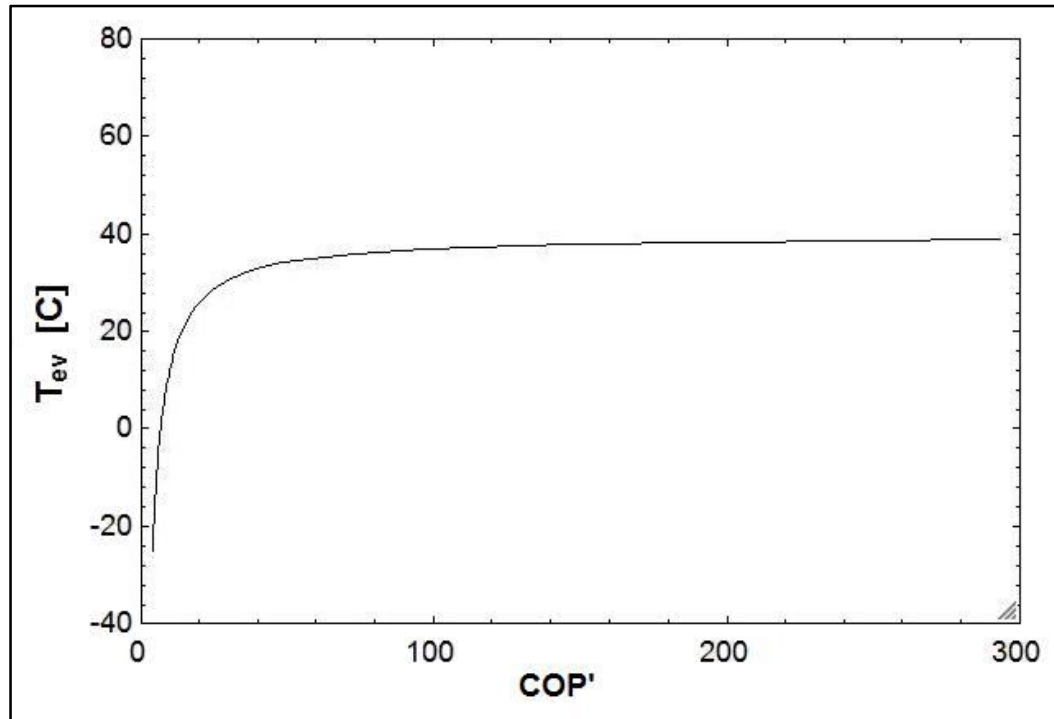


Figura 2.9 – Comportamento da curva no caso limite.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3 COMPONENTES DO SISTEMA E MÉTODOS DE CÁLCULO

3.1 Estudo de Caso – IMREA Lapa

De modo a avaliar os conceitos discutidos, foi selecionada uma instalação citada por Quintas Júnior (2013), em que existe a necessidade de água quente para banho e aquecimento de piscina. A instalação em questão é do Instituto de Medicina e Reabilitação Física do Hospital das Clínicas, da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo e da Rede Lucy Montoro, localizado no Bairro da Lapa, cidade de São Paulo. O instituto promove a inclusão social da pessoa com deficiência por meio de um processo integrado de reabilitação, que inclui a prestação de atendimentos clínicos e terapêuticos, oportunidade de capacitação profissional e geração de renda.

Dentre os setores de atendimento do IMREA está a área de Condicionamento Físico e Piscina, que é objeto deste estudo. A área conta com piscina aquecida e vestiários, que possuem chuveiros elétricos. A temperatura da piscina deve ser mantida entre 32°C e 34°C, enquanto a temperatura de alimentação dos chuveiros é de 45°C.

Para pleno atendimento do sistema, a proposta é a utilização de uma Central de Água Quente, que deverá atender a carga térmica da piscina e dos chuveiros. Para isso, serão considerados alguns arranjos diferentes. O primeiro arranjo utiliza apenas bombas de calor para alimentar o reservatório térmico, o segundo possui coletores solares térmicos e, finalmente, o terceiro arranjo é atendido por coletores solares térmicos associados em série com bombas de calor, fornecendo calor ao evaporador da bomba de calor. O objetivo ao analisar os três arranjos é verificar os conceitos expostos no capítulo 2 e definir o arranjo mais viável para a instalação.

Qualquer um dos arranjos deve atender a carga térmica definida no estudo realizado por Quintas Júnior (2013). No cálculo da carga térmica da piscina, foram consideradas as perdas térmicas por evaporação e convecção, conforme Duffie e Beckman (1980). A carga térmica diária para manter a temperatura entre 32°C e 34°C é de 1.192,4 MJ por dia. No cálculo da carga térmica dos chuveiros foram considerados dados de vazão, tempo e temperatura de uso e quantidade de banhos diários. A carga térmica total dos chuveiros é de 785 MJ por dia. Portanto, a carga

térmica total diária para atendimento da piscina e dos chuveiros é 1.977,4 MJ por dia ou 472.293,9 kcal por dia.

3.2 Sistema de aquecimento com Bombas de Calor

O primeiro arranjo consiste no atendimento total da carga térmica apenas com bombas de calor convencionais. A Figura 3.1 mostra a curva de consumo e a curva de produção de água quente ao longo do dia.

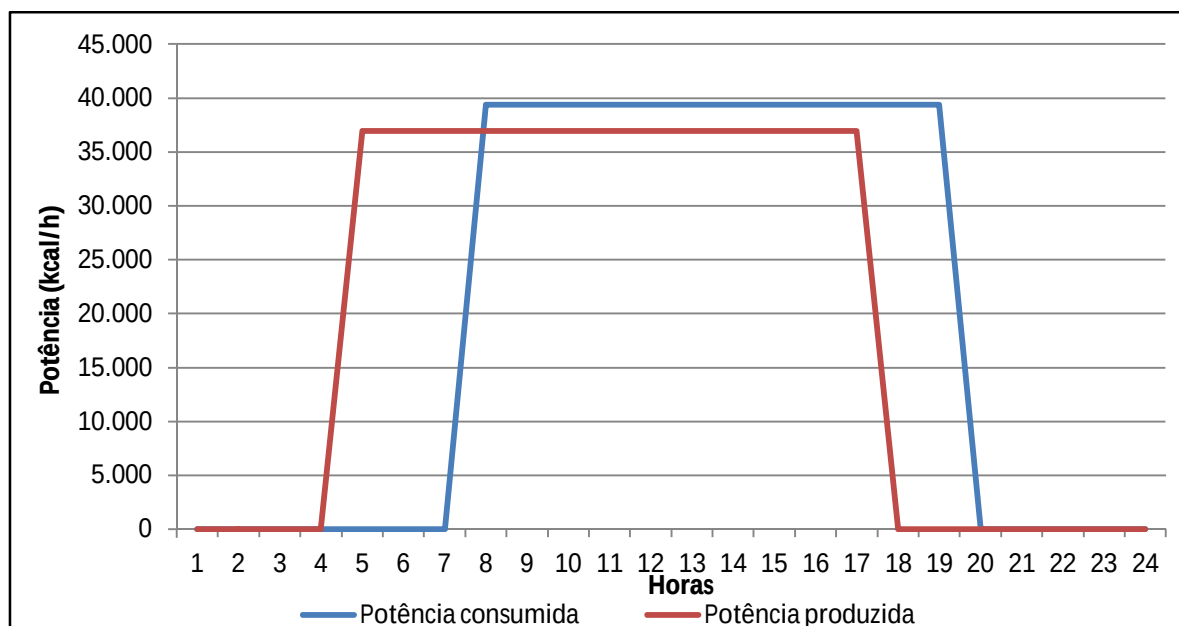


Figura 3.1 – Perfil Energético: Curvas de Consumo e Produção de água quente.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme levantando no local e mostrado na Figura 3.1, o consumo de água quente dos chuveiros inicia-se a partir das 07 horas da manhã e possui um perfil constante ao longo do dia, cessando às 19 horas. Como o uso dos chuveiros é condicionado ao uso da piscina, e esta permanece coberta durante a noite, a alimentação da piscina para manutenção da temperatura também se inicia também às 07 horas.

O dimensionamento do sistema foi feito considerando a capacidade térmica das bombas de calor para o período mais crítico do ano na cidade de São Paulo, que é o mês de Julho, em que a temperatura média do mês é 17°C. A produção de água quente inicia-se às 04 horas da manhã para alimentar o reservatório térmico. Este atinge a capacidade máxima às 07 horas da manhã, momento que inicia o consumo pelos chuveiros e pela piscina. As bombas de calor operam até às 17

horas, momento em que são desligadas. O consumo ocorre até às 20 horas, alimentado apenas pelo reservatório térmico. Portanto, as bombas de calor operam durante 13 horas diárias, considerando a capacidade térmica média de 18.465 kcal/h, e a capacidade mínima do reservatório térmico deverá ser de 110.790 kcal ou 463,85 MJ, que corresponde a um reservatório de 3.357,3 litros.

Na Tabela 3.1 estão os dados técnicos da bomba de calor selecionada do fabricante Jelly Fish, modelo BC120T.

Tabela 3.1 – Características Técnicas da Bomba de Calor selecionada

Dados Técnicos	
Fases (V- Φ -Hz)	220-3-60
Capacidade Nominal (kcal/h)	23.826*
Potência do compressor (kW)	5,55
COP água quente	3,72*
Comprimento (mm)	965
Largura (mm)	855
Altura (mm)	970
Peso (kg)	139
Vazão de água quente (m ³ /h)	5
Gás refrigerante	R22

*Temperatura do ar de 27°C.

Fonte: Catálogo Técnico Jelly Fish (2014).

A capacidade mínima do reservatório térmico é de 3.357,3 litros. Portanto, o reservatório selecionado é de 3.500 litros, conforme dados técnicos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características Técnicas do Reservatório Térmico selecionado

Dados Técnicos	
Capacidade (litros)	3.500
Isolamento Térmico	Poliuretano
Pressão de trabalho (m.c.a.)	5,0
Diâmetro (mm)	1.500
Comprimento (mm)	2.600
Apoio elétrico (kW)	15,0

Fonte: Catálogo Técnico Jelly Fish (2014).

A Figura 3.2 mostra as curvas de consumo e produção de água quente, no eixo da esquerda, e o perfil de energia do reservatório térmico ao longo do dia, no eixo da direita.

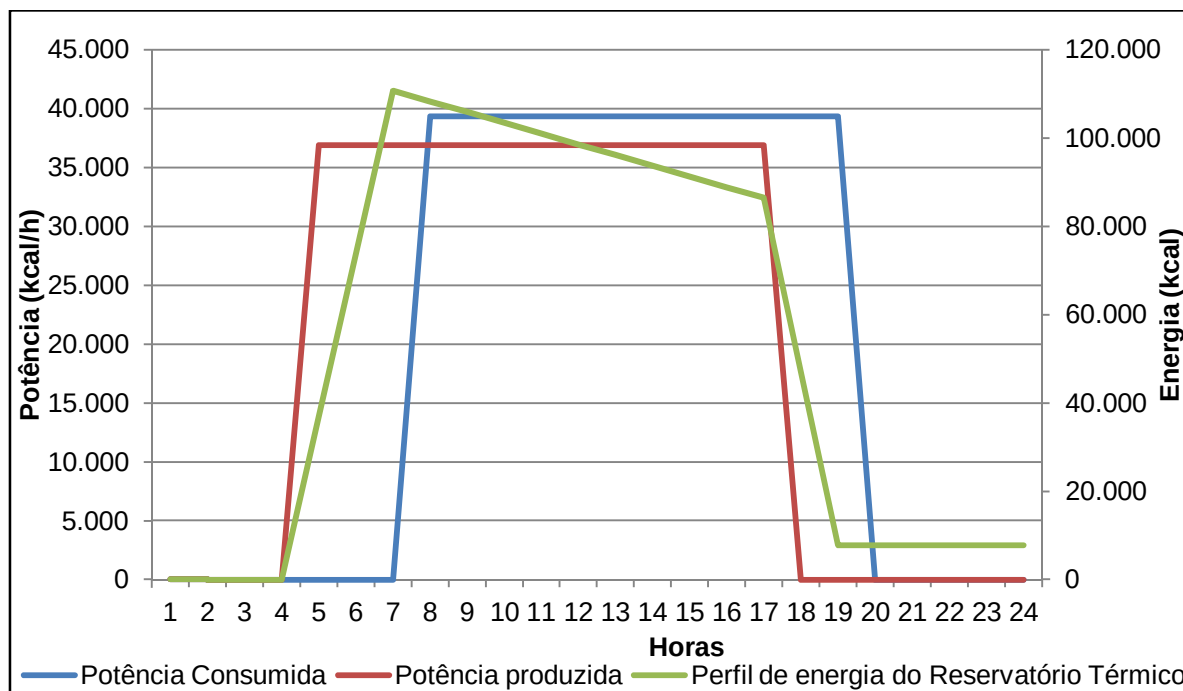


Figura 3.2 – Curva de consumo e produção de água quente e perfil de energia do reservatório térmico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, os equipamentos do primeiro sistema são:

- 02 bombas de calor modelo BC120T, fabricante Jelly Fish;
- 01 reservatório térmico de 3.500 litros, fabricante Jelly Fish;
- Tubulações com isolamento térmico e acessórios.

3.3 Sistema Solar Térmico

Este arranjo utiliza energia solar para atendimento da carga térmica e conta com bombas de calor como suprimento auxiliar para períodos de baixa insolação. Este arranjo também pode ser caracterizado como um sistema solar combinado com bomba de calor em paralelo. Para o atendimento dos chuveiros dos vestiários serão utilizados coletores planos e um reservatório térmico e para atender as piscinas serão utilizados coletores de polipropileno preto, ou seja, serão dois sistemas independentes.

O dimensionamento do sistema solar térmico para banho segue as orientações da ABNT NBR 15.569:2008. Conforme os cálculos realizados, expostos no Apêndice 1, o sistema solar térmico da instalação será composto por 40 coletores solares planos de 2 m² de área unitária, totalizando 80 m² de área de coleta, dados técnicos na Tabela 3.3. Apesar de a norma sugerir o armazenamento de 75% do volume consumido diariamente, neste caso não será necessário, visto que o consumo acontece praticamente junto com a produção, reduzindo o volume armazenado para 01 reservatório térmico de 1.500 litros, dados técnicos na Tabela 3.4, para atender os chuveiros. Para o aquecimento da piscina serão necessários 120 m² de área de coleta, dados técnicos na Tabela 3.5.

Tabela 3.3 – Características técnicas do coletor solar para banho selecionado

Dados Técnicos	
Largura (mm)	2.010
Comprimento (mm)	1.000
Diâmetro de entrada/Saída (mm)	22,0
Peso cheio (kg)	29,2
Peso vazio (kg)	27,7
Pressão de operação (m.c.a)	40,0
Produção específica (kWh/m ² .mês)	84,8
Eficiência energética (%)	60,7

Fonte: Quintas Júnior (2013).

Tabela 3.4 – Características Técnicas do Reservatório Térmico selecionado

Dados Técnicos	
Capacidade (litros)	1.500
Isolamento Térmico	Poliuretano
Pressão de trabalho (m.c.a.)	40,0
Diâmetro (mm)	1.200
Comprimento (mm)	1.875
Apoio elétrico (kW)	7,5

Fonte: Quintas Júnior (2013).

Tabela 3.5 – Características técnicas do coletor solar para piscina selecionado

Dados Técnicos	
Largura (mm)	275
Comprimento (mm)	4.000
Diâmetro de entrada/Saída (mm)	40,0
Peso cheio (kg)	4,8
Peso vazio (kg)	3,0
Pressão de operação (m.c.a)	20,0
Produção específica (kWh/m ² .mês)	93,4
Eficiência energética (%)	71,5

Fonte: Quintas Júnior (2013).

O sistema auxiliar será composto por bombas de calor, conforme dimensionamento do primeiro arranjo, visto que, em caso de baixa ou ausência de insolação, as bombas de calor devem atender integralmente a carga térmica. Como neste arranjo a carga térmica dos chuveiros é independente carga térmica da piscina, apenas uma bomba de calor do modelo BC120T, fabricante Jelly Fish, especificada no primeiro arranjo, é suficiente para atender toda a carga térmica sem a energia solar. Para este caso extremo, a bomba funcionaria durante 11 horas no dia. Num dia típico, a energia solar atende a demanda o dia todo, com exceção das primeiras horas do dia, momento que a bomba de calor irá atuar. Para esta situação, a bomba de calor irá operar apenas 1,5 horas por dia. A Figura 3.3 mostra as curvas de produção de água quente com energia solar e a bomba de calor.

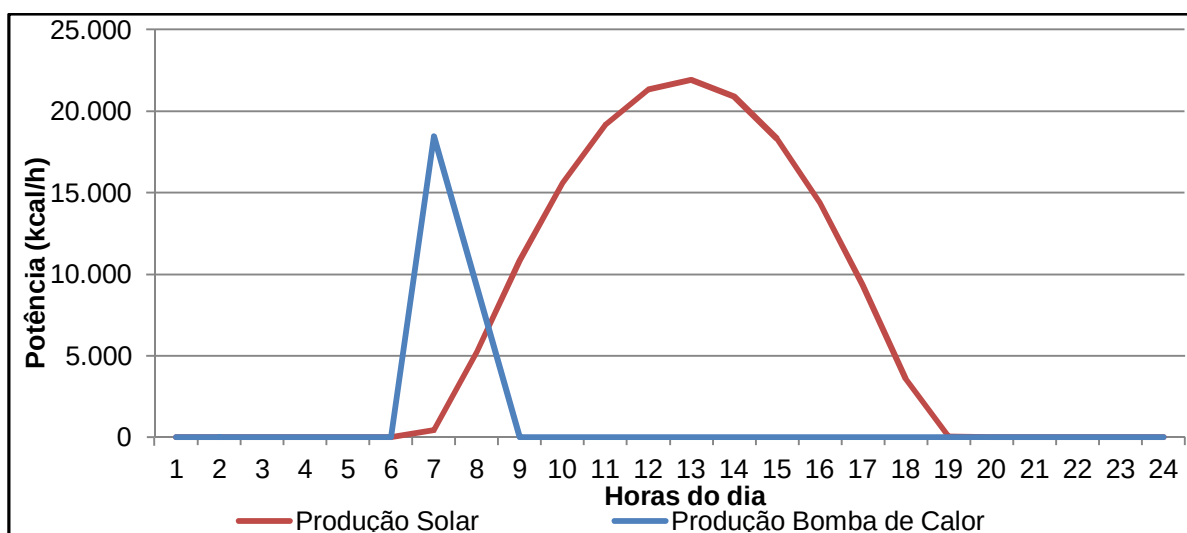


Figura 3.3 – Produção de água quente com energia solar e bomba de calor para banho.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.4 mostra a produção total diária de água quente, ou seja, a soma da produção solar com a produção pela bomba de calor no eixo da esquerda e o perfil de energia do reservatório térmico.

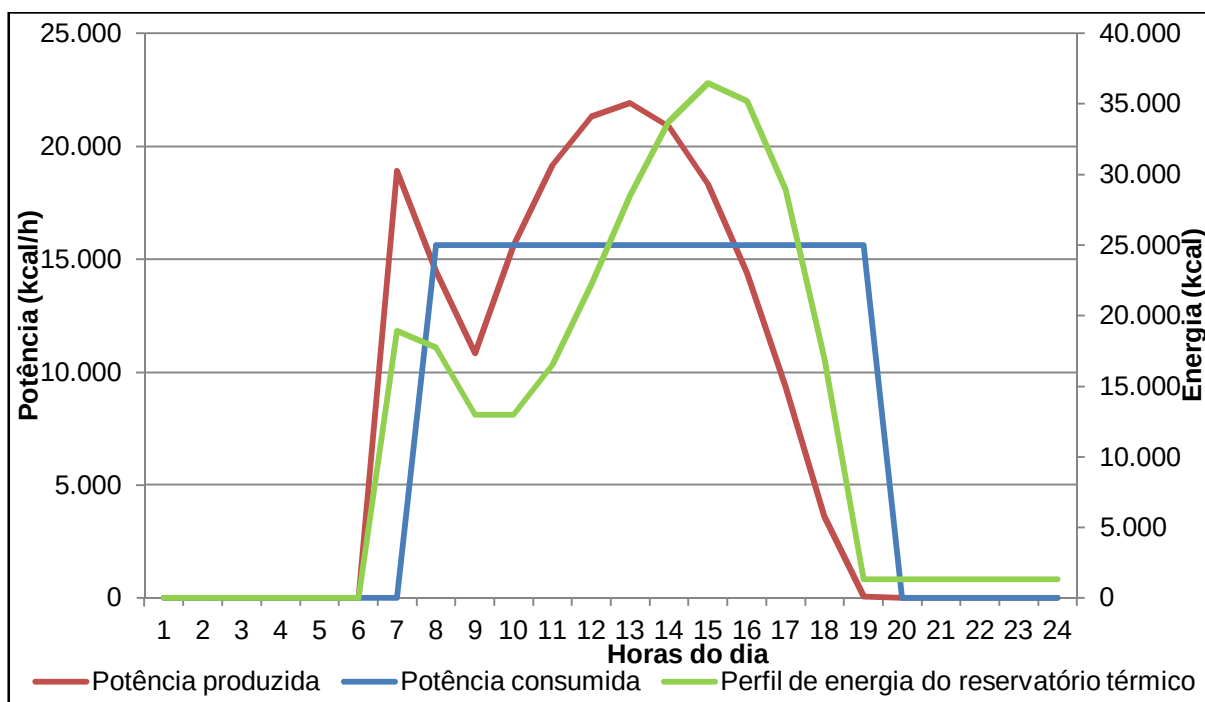


Figura 3.4 – Curva da produção total de água quente, consumo e do reservatório térmico para banho.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A energia auxiliar da piscina também será através de bombas de calor, modelo BC80T, fabricante Jelly Fish, que, na ausência de insolação, irá operar durante o período em que a piscina ficará descoberta e em uso, durante 11 horas diárias. Num dia típico, a energia solar atende a demanda, exceto no início e no fim do dia, momentos em que a bomba de calor irá atuar por 1,5 horas. A Tabela 3.6 mostra os dados técnicos da bomba de calor selecionada e a Figura 3.5 mostra a produção de água quente com energia solar e pela bomba de calor.

Tabela 3.6 – Características Técnicas da Bomba de Calor selecionada

Dados Técnicos	
Fases (V- Φ -Hz)	220-3-60
Capacidade Nominal (kcal/h)	18.723*
Potência do compressor (kW)	4,27
COP água quente	3,61*
Comprimento (mm)	965
Largura (mm)	855
Altura (mm)	770
Peso (kg)	102
Vazão de água quente (m ³ /h)	4,0
Gás refrigerante	R22

*Temperatura do ar de 27°C.

Fonte: Catálogo Técnico Jelly Fish (2014).

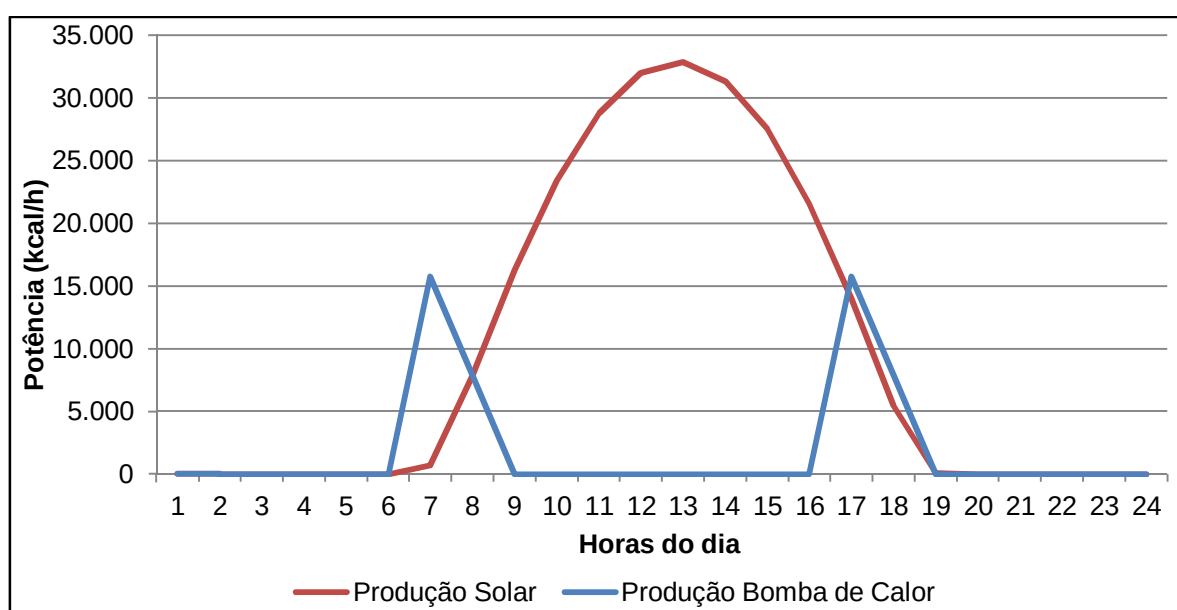


Figura 3.5 – Produção de água quente com energia solar e bomba de calor para piscina.
 Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.6 mostra a produção total de água quente para a piscina, a carga térmica da mesma e a energia acumulada ao longo do dia.

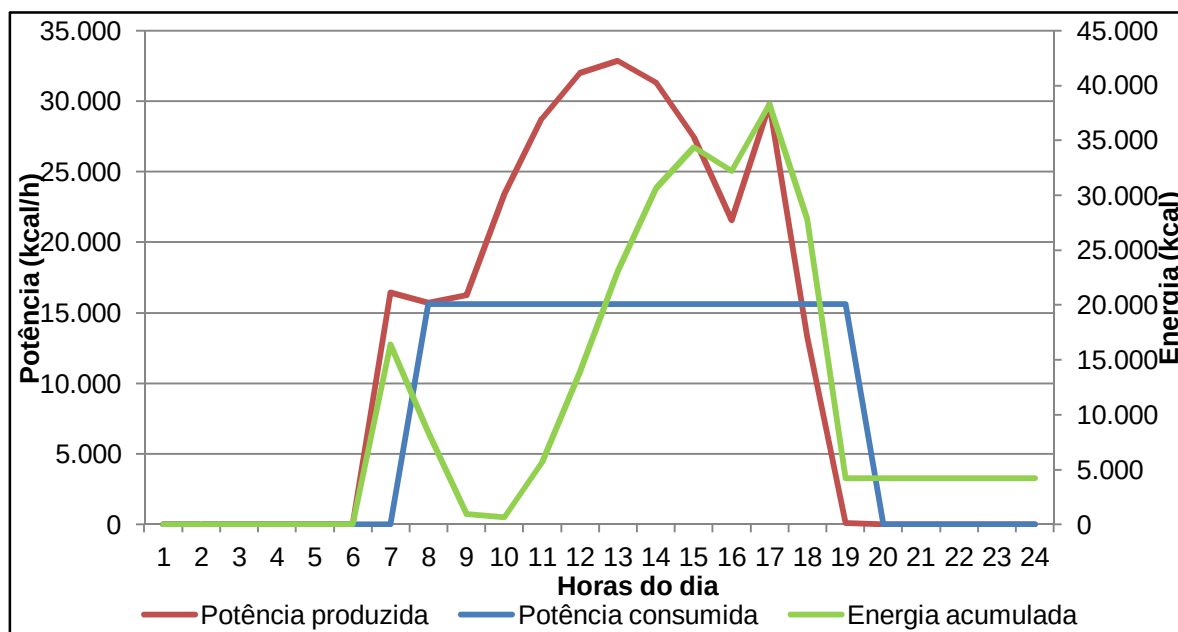


Figura 3.6 – Curva de produção total de água quente, demanda térmica e energia acumulada na piscina.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, os equipamentos do segundo arranjo são:

- 40 coletores solares modelo Blue 8-2,01, fabricante Prosol;
- 01 reservatório térmico de 1.500 litros, fabricante Prosol;
- 01 bomba de calor modelo BC120T, fabricante Jelly Fish;
- 120 m² de coletores solares de piscina em polipropileno preto, fabricante Prosol;
- 01 bomba de calor modelo BC80T, fabricante Jelly Fish;
- Tubulações com isolamento térmico e acessórios.

3.4 Sistema Solar Térmico combinado com Bomba de Calor

Neste arranjo, a energia solar é utilizada como fonte térmica no evaporador da bomba de calor para melhorar o desempenho da mesma. Os parâmetros para o dimensionamento deste arranjo são os mesmos utilizados no dimensionamento do sistema que conta apenas com bombas de calor. A diferença será no tipo da bomba de calor, que utiliza água quente no evaporador em vez do ar atmosférico e, consequentemente, a temperatura média do local não será problema. A curva de consumo é a mesma, porém, como será utilizado outro modelo de bomba de calor, a curva de produção de água quente muda e, consequentemente, a curva do

reservatório térmico também. A Figura 3.7 mostra as curvas de consumo e produção de água quente no eixo da esquerda e do perfil de energia do reservatório térmico no eixo da direita. A Tabela 3.7 mostra os dados técnicos da bomba de calor selecionada neste arranjo.

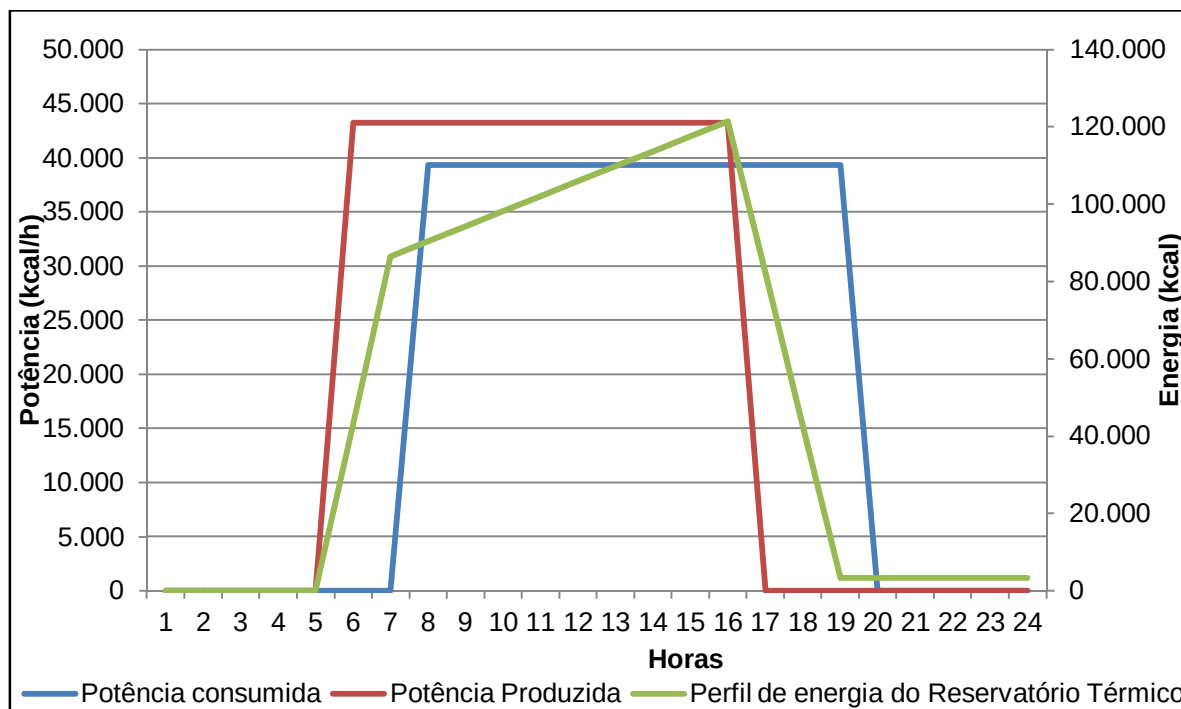


Figura 3.7 – Curvas de consumo e produção de água quente e perfil de energia do reservatório térmico.

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3.7 – Dados Técnicos da bomba de calor selecionada

Dados Técnicos	
Fases (V- Φ -Hz)	220-3-60
Capacidade Nominal (kcal/h)	21.622
Potência do compressor (kW)	8,30
COP água quente	3,0
Vazão de água quente (m ³ /h)	5,0
Gás refrigerante	R22

Fonte: Catálogo Técnico Jelly Fish (2014)

Com as características apresentadas, a produção de água quente inicia-se às 05 horas para alimentar o reservatório térmico e encerra-se às 17 horas, totalizando 11 horas de operação. O reservatório térmico deverá ter capacidade mínima de 121.465 kcal ou 508,5 MJ, que corresponde a um reservatório de 3.918 litros.

Portanto, o reservatório térmico selecionado é de 4.000 litros. A Tabela 3.8 mostra os dados técnicos do reservatório térmico.

Tabela 3.8 – Dados Técnicos do reservatório térmico selecionado

Dados Técnicos	
Capacidade (litros)	4.000
Isolamento Térmico	Poliuretano
Pressão de trabalho (m.c.a.)	5,0
Diâmetro (mm)	1.500
Comprimento (mm)	2.900
Apoio elétrico (kW)	15,0

Fonte: Catálogo Técnico Jelly Fish (2014).

Com a definição das bombas de calor e do reservatório térmico para atender a demanda dos chuveiros e piscina, deve-se dimensionar o sistema solar térmico que será utilizado para atender a demanda térmica dos evaporadores das bombas de calor. De acordo com o catálogo técnico do fabricante das bombas de calor, os dados técnicos da Tabela 3.7 correspondem à temperatura de 35°C da água que alimenta o evaporador da bomba de calor, para uma troca térmica de 17.300 kcal/h.

O sistema solar térmico possuirá coletores planos e um reservatório térmico, que permitirá o funcionamento das bombas de calor durante a noite, período a partir das 05 horas, conforme citado anteriormente. Para a troca térmica necessária, o montante diário de energia captada do sol deverá alcançar o valor de 190.300 kcal ao longo do dia para cada bomba de calor, correspondendo a 11 horas de funcionamento das mesmas. Portanto, o total de energia que deverá ser captada do sol será de 380.600 kcal por dia ou 1.593,5 MJ por dia. Considerando o rendimento do coletor selecionado, modelo JFS20, fabricante Jelly Fish, no valor de 63,9% e, como a demanda térmica no evaporador da bomba de calor deve ser atendida integralmente, o dimensionamento será realizado para o mês mais desfavorável para energia solar na cidade de São Paulo, o mês de junho, com irradiação de 10 MJ/(m²·dia).

$$A_{coletora} = \frac{E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}}{I_G \times \eta_{col}}$$

Onde:

$A_{coletora}$ = é a área coletora em m^2 ;

E_{perdas} = perdas térmicas nos circuitos, expresso em MJ/dia (sugerido 15% da energia útil);

I_G = é o valor da irradiação global para o mês de junho na cidade de São Paulo, expresso em MJ/($m^2 \cdot dia$), no valor de 10 MJ/($m^2 \cdot dia$);

η_{col} é o rendimento do coletor solar selecionado.

$$A_{coletora} = \frac{1.593,5 + 0,15 \times 1.593,5}{10 \times 0,639}$$

$$A_{coletora} = \frac{1.832,53}{6,39}$$

$$A_{coletora} = 286,8 m^2$$

Portanto, para atendimento da demanda térmica de evaporação das bombas de calor serão necessários 286,8 m^2 de área coletora, que representam 144 coletores solares planos de 2,0 m^2 de área unitária. A Tabela 3.9 mostra os dados técnicos do coletor solar selecionado.

Tabela 3.9 – Características técnicas do coletor solar para banho selecionado

Dados Técnicos	
Largura (mm)	2.000
Comprimento (mm)	1.000
Peso cheio (kg)	30,1
Peso vazio (kg)	27,8
Pressão de operação (m.c.a)	40,0
Eficiência energética (%)	63,9

Fonte: Catálogo Técnico Jelly Fish (2014).

Para dimensionar o reservatório térmico, será adotado o período inicial de operação. O sistema inicia a produção de água quente às 05 horas da manhã, período sem insolação, e opera continuamente até às 17 horas. Considerando que, para o mês mais desfavorável, o aquecimento solar inicia sua operação às 09 horas, então o reservatório térmico deverá atuar das 05 horas às 08 horas da manhã.

Durante este período, o reservatório térmico deverá fornecer 138.400 kcal para as bombas de calor. O volume correspondente do reservatório térmico será de 3.640 litros, considerando 60°C para temperatura de armazenamento. A Tabela 3.10 mostra os dados técnicos do reservatório térmico selecionado

Tabela 3.10 – Características Técnicas do Reservatório Térmico selecionado

Dados Técnicos	
Capacidade (litros)	3.500
Isolamento Térmico	Poliuretano
Pressão de trabalho (m.c.a.)	5,0
Diâmetro (mm)	1.500
Comprimento (mm)	2.600
Apoio elétrico (kW)	15,0

Fonte: Catálogo Técnico Jelly Fish (2014).

Portanto, os equipamentos do terceiro sistema são:

- 02 bombas de calor modelo WW70, fabricante Jelly Fish;
- 01 reservatório térmico de 4.000 litros, fabricante Jelly Fish;
- 144 coletores solares modelo JFS20, fabricante Jelly Fish;
- 01 reservatório térmico de 3.500 litros, fabricante Jelly Fish;
- Tubulações com isolamento térmico e acessórios.

4 RESULTADOS

Neste capítulo será abordada a operação dos arranjos supracitados e análise econômica.

4.1 Sistema com bombas de calor

O primeiro arranjo foi dimensionado para atender a demanda térmica no período mais desfavorável do ano, o inverno, em particular o mês de julho. Devido a este fato, durante o verão, as bombas de calor operam menos tempo durante o dia para atender a mesma demanda. Conforme exposto no capítulo 2, bombas de calor que utilizam o ar atmosférico para a troca térmica no evaporador ficam sujeitas as condições meteorológicas, com um rendimento superior na estação mais quente do ano.

Para mostrar essa variação, com base nas temperaturas médias de cada mês, a Tabela 4.1 mostra o número de horas de funcionamento de cada equipamento.

Tabela 4.1 – Horas de funcionamento de cada bomba de calor

Mês	Horas de Funcionamento
Janeiro	11,5
Fevereiro	11,5
Março	11,5
Abril	11,5
Maio	13,0
Junho	13,0
Julho	13,0
Agosto	13,0
Setembro	13,0
Outubro	13,0
Novembro	11,5
Dezembro	11,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Deste modo, o consumo de energia elétrica varia ao longo do ano. Considerando apenas os dias úteis e o período de operação diária das duas bombas de calor, tem-se:

$$E_{C,BC} = n^{\circ}_{horas} \times P_{C,BC}$$

Onde:

$E_{C,BC}$ é a energia consumida pelas bombas de calor ao longo do ano, em kWh/ano;

n°_{horas} é a quantidade de horas de funcionamento das bombas de calor ao longo do ano;

$P_{C,BC}$ é a potência do compressor das bombas de calor, em kW.

$$E_{C,BC} = 6.183 \times 5,55$$

$$E_{C,BC} = 34.315,65 \text{ kWh/ano}$$

O dimensionamento também considerou a operação fora do horário de ponta da distribuidora, fato que reduz custos associados à energia elétrica. Portanto, o custo da energia é:

$$C_{A,BC} = E_{C,BC} \times T_E$$

Onde:

$C_{A,BC}$ é o custo total anual de energia para operar as bombas de calor, em reais/ano;

$E_{C,BC}$ é a energia consumida pelas bombas de calor ao longo do ano, em kWh/ano;

T_E é a tarifa de energia da distribuidora que atende a instalação, no caso, a AES Eletropaulo, no valor de R\$156,18/MWh.

$$C_{A,BC} = 34.315,65 \times \frac{156,18}{1000}$$

$$C_{A,BC} = R\$5.359,40/\text{ano}$$

Portanto, o custo anual com energia elétrica para operar as bombas de calor é de R\$5.359,40/ano.

4.1.1 Análise de viabilidade econômica

Para avaliar a viabilidade econômica de implantação deste projeto é necessário analisar alguns pontos importantes relativos a valor do investimento e economia obtida na mudança do sistema. Obtendo esses valores, é possível calcular indicadores econômicos que auxiliam na tomada de decisão, facilitando a escolha de se fazer ou não as modificações e, se existir mais de uma opção, escolher a melhor dentre as disponíveis.

No projeto em questão, a mudança proposta é a substituição de chuveiros elétricos, grandes consumidores de energia elétrica, por bombas de calor, equipamentos mais eficientes para aquecimento de água gerando economia de energia. Conforme o dimensionamento no item 3.2, o sistema é composto por 02 bombas de calor e um reservatório térmico para atender a demanda de aquecimento do centro de reabilitação estudado.

O valor do investimento para aquisição e instalação dos equipamentos citados é de R\$84.150,00. Para uma análise correta da situação, é necessário saber se o novo sistema proporcionará redução no consumo de energia elétrica da unidade, resultando em economia na fatura de energia elétrica.

A instalação atual contém 11 chuveiros elétricos de 5.200 W cada, que atendem os vestiários, e uma bomba de calor para o aquecimento da piscina, que fica ligada o tempo todo e possui potência de 6,9 kW. Apesar da quantidade de chuveiros existentes, apenas 4 banhos por hora são efetuados. Porém, a unidade tem planos de expandir o atendimento, aumentando a quantidade de usuários. O novo sistema foi dimensionado prevendo esse aumento. Portanto, o valor utilizado para o cálculo do consumo atual é a nova quantidade de banhos diários.

$$E_{C,Ch} = n^{\circ}_{banhos} \times t_{banho} \times n^{\circ}_{dias} \times P_{Ch}$$

Onde:

$E_{C,Ch}$ é a energia consumida ao longo do ano pelos chuveiros elétricos, em kWh/ano;

n°_{banhos} é o número diário de banhos;

t_{banho} é o tempo médio de cada banho, em horas;

n°_{dias} é o número de dias úteis do ano;

P_{Ch} é a potência elétrica do chuveiro, em kW.

$$E_{C,Ch} = 144 \times \frac{10}{60} \times 252 \times 5,2$$

$$E_{C,Ch} = 31.449,6 \text{ kWh/ano}$$

Portanto, ao longo de um ano, os chuveiros elétricos irão consumir 31.449,6 kWh/ano de energia elétrica.

O cálculo do consumo da bomba de calor que atende a piscina, conforme citado no texto, a potência elétrica da bomba de calor existente é de 6,9 kW e a mesma fica ligada o tempo todo. Então:

$$E_{C,BCex} = n^{\circ}_{horas} \times n^{\circ}_{dias} \times P_{C,BCex}$$

Onde:

$E_{C,BCex}$ é a energia consumida pela bomba de calor existente ao longo do ano, em kWh/ano;

n°_{horas} é o tempo que ela fica ligada, em horas;

n°_{dias} é o número de dias do ano;

$P_{C,BCex}$ é a potência do compressor da bomba de calor existente.

$$E_{C,BCex} = 24 \times 365 \times 6,9$$

$$E_{C,BCex} = 60.444 \text{ kWh/ano}$$

Portanto, o consumo total dos chuveiros e da piscina é de 91.893,6 kWh/ano. Para o cálculo do valor a ser pago pela energia elétrica consumida é necessário a separação do funcionamento durante o horário de ponta da distribuidora, por possuir uma tarifa diferente. No caso da bomba de calor existente, ela opera o tempo todo, já os chuveiros operam apenas 1,5 horas por dia no horário de ponta.

$$C_{A,Ch} = E_{C,ChP} \times T_{EP} + E_{C,ChFP} \times T_{EFP}$$

Onde:

$C_{A,Ch}$ é o custo anual da energia elétrica consumida pelos chuveiros, em reais/ano;

$E_{C,ChP}$ é a energia consumida pelos chuveiros elétricos ao longo do ano no horário de ponta, em kWh/ano;

T_{EP} é a tarifa de energia da AES Eletropaulo no horário de ponta, no valor de R\$458,17/MWh;

$E_{C,ChFP}$ é a energia consumida pelos chuveiros elétricos ao longo do ano fora do horário de ponta, em kWh/ano;

T_{EFP} é a tarifa de energia da AES Eletropaulo fora do horário de ponta, no valor de R\$156,18/MWh.

$$C_{A,Ch} = 3.931,2 \times \frac{458,17}{1000} + 27.518,4 \times \frac{156,18}{1000}$$

$$C_{A,Ch} = R\$6.099,00/ano$$

Então, o custo anual de energia elétrica dos chuveiros é R\$6.099,00/ano.

O cálculo do custo anual da bomba de calor existente.

$$C_{A,BCex} = E_{C,BCexP} \times T_{EP} + E_{C,BCexFP} \times T_{EFP}$$

Onde:

$C_{A,BCex}$ é o custo anual de energia elétrica consumida pela bomba de calor existente, em reais/ano;

$E_{C,BCexP}$ é a energia consumida pela bomba de calor existente no horário de ponta, em kWh/ano;

$E_{C,BCexFP}$ é a energia consumida pela bomba de calor existente fora do horário de ponta, em kWh/ano.

$$C_{A,BCex} = 5.216,4 \times \frac{458,17}{1000} + 55.227,6 \times \frac{156,18}{1000}$$

$$C_{A,BCex} = R\$11.015,50/ano$$

Então, o custo anual de energia elétrica da bomba de calor existente é R\$11.015,50/ano. Portanto, o gasto anual total em energia elétrica para aquecimento de água é R\$17.114,50/ano.

Os equipamentos e instalação foram cotados com um fornecedor local, que informou o valor de R\$84.150,00.

Analisando o consumo energético da instalação atual com a proposta, existe uma economia anual significativa, no valor de R\$11.755,00/ano. Considerando este valor o fluxo de caixa anual do investimento, o *payback* simples do projeto é 7,1 anos e a Taxa Interna de Retorno – TIR é 13%.

4.2 Sistema solar térmico

O segundo arranjo é atendido, na maior parte, pela energia solar. Isso significa que haverá grande economia operacional, visto que a bomba de calor somente entrará em funcionamento poucas horas no ano. Mesmo no mês mais desfavorável para energia solar, que é o mês de junho, a energia solar é responsável por 60% do atendimento da demanda térmica para banho da instalação. Este é o único mês que a bomba de calor opera por 04 horas ao longo de um dia. A Tabela 4.2 mostra as horas de funcionamento diário do equipamento mês a mês e a fração solar.

Tabela 4.2 – Horas de funcionamento do equipamento e fração solar - banho

Mês	Horas de Funcionamento	Fração Solar
Janeiro	0,5	0,98
Fevereiro	1,0	0,98
Março	1,0	0,98
Abril	1,5	0,86
Maio	3,0	0,73
Junho	4,0	0,61
Julho	3,0	0,73
Agosto	3,0	0,73
Setembro	1,5	0,86
Outubro	1,0	0,98
Novembro	0,5	0,98
Dezembro	0,5	0,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, a operação anual da bomba de calor para banho é:

$$E_{C,BC} = n^{\circ}_{horas} \times P_{C,BC}$$

Onde:

$E_{C,BC}$ é a energia consumida pela bomba de calor ao longo do ano, em kWh/ano;

n°_{horas} é a quantidade de horas de funcionamento da bomba de calor ao longo do ano;

$P_{C,BC}$ é a potência do compressor da bomba de calor, em kW.

$$E_{C,BC} = 431 \times 5,55$$

$$E_{C,BC} = 2.392 \text{ kWh/ano}$$

O dimensionamento também considerou a operação fora do horário de ponta da distribuidora, fato que reduz custos associados à energia e tarifa do uso do sistema de distribuição. Portanto, o custo da energia é:

$$C_{A,BC} = E_{C,BC} \times T_E$$

Onde:

$C_{A,BC}$ é o custo total anual de energia para operar a bomba de calor, em reais/ano;

$E_{C,BC}$ é a energia consumida pela bomba de calor ao longo do ano, em kWh/ano;

T_E é a tarifa de energia da AES Eletropaulo, no valor de R\$156,18/MWh.

$$C_{A,BC} = 2.392 \times \frac{156,18}{1000}$$

$$C_{A,BC} = R\$373,60/\text{ano}$$

Portanto, o custo anual com energia elétrica para operar a bomba de calor para banho é de R\$373,60/ano.

Para o atendimento da carga térmica da piscina também será usado a energia solar junto com uma bomba de calor como fonte auxiliar. A Tabela 4.3 mostra as horas de funcionamento diário do equipamento mês a mês e a fração solar.

Tabela 4.3 – Horas de funcionamento do equipamento e fração solar - piscina

Mês	Horas de Funcionamento	Fração Solar
Janeiro	0,0	1,0
Fevereiro	1,5	0,96
Março	1,5	0,97
Abril	3,0	0,85
Maio	6,0	0,73
Junho	8,5	0,60
Julho	6,0	0,72
Agosto	6,0	0,72
Setembro	3,5	0,85
Outubro	1,0	0,97
Novembro	1,0	0,97
Dezembro	1,0	0,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, a operação anual da bomba de calor para a piscina é:

$$E_{C,BC} = n^{\circ}_{horas} \times P_{C,BC}$$

Onde:

$E_{C,BC}$ é a energia consumida pela bomba de calor ao longo do ano, em kWh/ano;

n°_{horas} é a quantidade de horas de funcionamento da bomba de calor ao longo do ano;

$P_{C,BC}$ é a potência do compressor da bomba de calor, em kW.

$$E_{C,BC} = 818 \times 4,42$$

$$E_{C,BC} = R\$3.615,56 \text{ kWh/ano}$$

A operação da bomba de calor da piscina, em alguns meses, acontece durante o horário de ponta da distribuidora. Portanto, o custo da energia é:

$$C_{A,BC} = E_{C,BCP} \times T_{EP} + E_{C,BCFP} \times T_{EFP}$$

Onde:

$C_{A,BC}$ é o custo anual de energia elétrica consumida pela bomba de calor, em reais/ano;

$E_{C,BCP}$ é a energia consumida pela bomba de calor no horário de ponta, em kWh/ano;

$E_{C,BCFP}$ é a energia consumida pela bomba de calor fora do horário de ponta, em kWh/ano;

T_{EP} é a tarifa de energia da AES Eletropaulo no horário de ponta, no valor de R\$458,17/MWh;

T_{EFP} é a tarifa de energia da AES Eletropaulo fora do horário de ponta, no valor de R\$156,18/MWh.

$$C_{A,BC} = 974,61 \times \frac{458,17}{1000} + 2.640,95 \times \frac{156,18}{1000}$$

$$C_{A,BC} = R\$859,00/\text{ano}$$

Então, o custo anual com energia elétrica para operar a bomba de calor para piscina é de R\$859,00/ano. O gasto total de operação de ambos os sistemas, banho e piscina, é de R\$1.232,60/ano.

4.2.1 Análise de viabilidade econômica

Neste caso, a proposta é a substituição do sistema atual por coletores solares auxiliados por bombas de calor. Conforme o dimensionamento no item 3.3, o sistema é composto por 40 coletores solares de 2 m² de área unitária, totalizando 80 m² de área de coleta, 01 reservatório térmico de 1.500 litros e 01 bomba de calor para atender os banhos dos vestiários e 120 m² de coletores solares de polipropileno e 01 bomba de calor para atender a piscina.

O valor do investimento para aquisição e instalação dos equipamentos citados é de R\$100.990,00.

Como calculado no item 4.1.1, o consumo total da instalação atual é R\$17.114,50/ano.

Analisando o consumo energético da instalação atual com a segunda proposta, existe uma economia anual significativa, no valor de R\$15.881,90/ano.

Considerando este valor o fluxo de caixa anual do investimento, o *payback* simples do projeto é 6,3 anos e a Taxa Interna de Retorno – TIR é 15%.

4.3 Sistema solar combinado com bombas de calor

O terceiro arranjo foi dimensionado para atender a demanda térmica total e, como utiliza bombas de calor que usam água no evaporador, não são influenciadas pelas condições ambientes do local de instalação. Como a capacidade térmica da mesma não varia ao longo do ano, sua operação é constante. Para atender a demanda térmica diária da instalação, 02 bombas de calor operam durante 11 horas diárias.

Deste modo, o consumo de energia elétrica, considerando os dias úteis e o período de operação diária das duas bombas de calor, tem-se:

$$E_{C,BC} = n^{\circ}_{horas} \times P_{C,BC}$$

Onde:

$E_{C,BC}$ é a energia consumida pelas bombas de calor ao longo do ano, em kWh/ano;

n°_{horas} é a quantidade de horas de funcionamento das bombas de calor ao longo do ano;

$P_{C,BC}$ é a potência do compressor das bombas de calor, em kW.

$$E_{C,BC} = 5.544 \times 8,3$$

$$E_{C,BC} = 46.015,2 \text{ kWh/ano}$$

Como a operação acontece fora do horário de ponta da distribuidora, o custo da energia é:

$$C_{A,BC} = E_{C,BC} \times T_E$$

Onde:

$C_{A,BC}$ é o custo total anual de energia para operar as bombas de calor, em reais/ano;

$E_{C,BC}$ é a energia consumida pelas bombas de calor ao longo do ano, em kWh/ano;

T_E é a tarifa de energia da AES Eletropaulo, no valor de R\$156,18/MWh.

$$C_{A,BC} = 46.015,2 \times \frac{156,18}{1000}$$

$$C_{A,BC} = R\$7.186,70/ano$$

Portanto, o custo anual com energia elétrica para operar as bombas de calor é de R\$7.186,70/ano.

4.3.1 Análise de viabilidade econômica

Neste caso, a proposta é a substituição do sistema atual por bombas de calor que operam auxiliadas por coletores solares, que fornecem calor ao evaporador da bomba de calor. Conforme o dimensionamento no item 3.4, o sistema é composto por 02 bombas de calor e 01 reservatório térmico de 4.000 litros para atender a carga térmica e, 144 coletores solares de 2 m² de área unitária, totalizando 288 m² de área de coleta e 01 reservatório térmico de 3.500 litros para atender a demanda térmica do evaporador das bombas de calor.

O valor do investimento para aquisição e instalação dos equipamentos citados é de R\$294.467,00.

Como calculado no item 4.1.1, o consumo total da instalação atual é R\$17.114,50/ano.

Analisando o consumo energético da instalação atual com a terceira proposta, existe uma economia anual de energia, no valor de R\$9.927,80. Considerando este valor o fluxo de caixa anual do investimento, o *payback* simples do projeto é superior a 20 anos e a Taxa Interna de Retorno – TIR é nula.

4.4 Análise e discussão dos resultados

Com os resultados obtidos da instalação atual e das propostas, é possível observar que haverá redução de custos operacionais nos três cenários citados

anteriormente. Contudo, a opção será por aquele que proporcionar a maior redução com o menor investimento.

A proposta com o menor investimento é a do item 4.1, que utiliza bombas de calor convencionais. É um sistema simples que apresenta eficiência superior a condição existente. Mas, pelo fato de depender exclusivamente da energia elétrica para operar, perde em economia para a segunda proposta, do item 4.2, que utiliza energia solar, reduzindo em mais de 90% os gastos com aquecimento, em comparação com a instalação atual. Apesar de exigir um investimento superior, é a proposta que apresenta o melhor resultado econômico, sendo, portanto, a mais indicada para implantação.

A terceira proposta, apresentada no item 4.3, exige um alto investimento em comparação com as duas anteriores e proporciona uma pequena redução nos custos, não atingindo um resultado econômico favorável.

Considerando outros cenários, por exemplo, na segunda proposta, retirar a energia auxiliar das bombas de calor utilizar o apoio por resistências elétricas do reservatório térmico. Apesar de aumentar o custo operacional, torna-se viável devido à redução do investimento, obtendo-se um resultado econômico um pouco melhor que o mostrado no item 4.2.1. Ainda na segunda proposta, a opção pela utilização do gás natural como energia auxiliar também é viável. A Tabela 4.4 mostra os valores das duas alterações citadas. Mas, quando comparado com uma central de água quente a gás natural, com um aquecedor de acumulação para este fim, o resultado é quase três vezes maior que o custo operacional atual da instalação.

Tabela 4.4 - Comparação do uso de eletricidade e gás natural como energia auxiliar

2º arranjo	Investimento	Custo Operacional	Economia	Payback (anos)	TIR
Eletricidade	R\$81.950,00	R\$2.252,90	R\$14.861,00	5,5	17%
Gás Natural	R\$85.850,00	R\$3.107,80	R\$14.006,00	6,1	15%

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

O objetivo desta monografia é analisar o coeficiente de performance de uma bomba de calor e a influência da temperatura de evaporação sobre o mesmo. Além disso, analisar a viabilidade econômica em uma aplicação deste conceito em um caso prático.

Conforme exposto na revisão bibliográfica, o aumento da temperatura de evaporação em uma bomba de calor também aumenta sua capacidade térmica, sendo necessárias menos horas de operação da mesma para alcançar o nível de aquecimento desejado. Este fato é observado no terceiro arranjo, que as bombas de calor operam por menos tempo que no primeiro arranjo e, por não serem influenciadas pela temperatura ambiente, a operação é constante o ano todo. Mas essa redução no tempo de funcionamento é insuficiente para um resultado econômico aceitável. Também é fundamental o fato de que o terceiro arranjo exige um investimento muito mais alto que os outros, pois além do sistema de aquecimento de água para o consumo é preciso também o sistema solar para alimentar a demanda térmica das bombas de calor.

Dos três arranjos propostos, o que apresenta maior economia operacional é o segundo, que utiliza energia solar para atendimento direto da demanda térmica. Como a maior parte da demanda é atendida pela energia solar, a economia anual é superior a 90% em relação com a instalação atual, sendo, portanto, a mais viável para implantação. Na proposta exposta neste documento, optou-se pela utilização de bombas de calor como fonte auxiliar de energia, em complementação com a energia solar, porém, a utilização do apoio elétrico do reservatório térmico ou por um aquecedor a gás natural também são alternativas viáveis. Apesar de aumentar o custo operacional, estas opções exigem um investimento menor. As conclusões econômico-financeiras deste trabalho estão associadas a atual estrutura de preços de energia elétrica do país (Junho/2014).

Para dar continuidade a este trabalho será interessante estudar se esse tipo de projeto se torna, em algum momento, viável, analisar outras configurações possíveis e comparar com dados com outros países, pelo fato de ser muito utilizado na América do Norte e Europa, principalmente através da energia geotérmica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Informações Técnicas – Tarifas Residenciais**. 2014. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>>. Acesso em: 13 mar. 2014.

_____. **Informações Técnicas – Banco de Informações da Geração**. 2014. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=12&fase=3>>. Acesso em: 19 mar. 2014.

_____. **Resolução Homologatória nº 1.563, de 2 de julho de 2013**. 2014. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh20131563.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2014.

_____. **Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012**. 2012. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 28 fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e Instalação**. Rio de Janeiro, 2008. 36p.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2ª. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 1980.

HALLER, M. Y.; FRANK, E. On the Potential of Using Heat From Solar Thermal Collectors for Heat Pump Evaporators. Disponível em <http://www.solarenergy.ch/fileadmin/daten/publ/Haller_SWC_2011.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2014.

Industrial Heat Pump for Steam and Fuel Savings. U. S. Department of Energy. Disponível em <http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/heatpump.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2014.

INMET. **Dados Históricos – Estação 83781, São Paulo/SP (Mirante de Santana)**. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 26 mar. 2014.

INMETRO. **Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água (PBE solar – coletores e reservatórios) – Tabelas de consumo/Eficiência energética**. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares.asp>>. Acesso em 09 mai. 2014.

JELLY FISH. **BOMBAS DE CALOR – Catálogos Técnicos**. Disponível em <<http://jellyfish.com.br/tecnicos/>>. Acesso em: 07 abr. 2014.

KALOGIROU, S. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. 1ª. ed. London: Elsevier Inc., 2009.

KJELLSSON, E. **Solar Collectors Combined with ground source heat pumps in Dwellings**. 2009. 167 p. Tese (Doutorado) – Lund University, Sweden, 2009. Disponível em <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1501869&fileId=1501885>>. Acesso em: 01 mar. 2014.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1ª. ed. São José dos Campos: INPE, 2006.

QUINTAS JÚNIOR, D. R. **Estudo de Oportunidades de Melhoria de Consumo de Energia no IMREA Lapa**. 101 p. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Programa de Educação Continuada em Engenharia, São Paulo, 2013.

SHAHED, A. M.; HARRISON, S. J. Preliminary Review of Geothermal Solar Assisted Heat Pumps. Disponível em http://www.appropedia.org/images/7/7a/PRELIMINARY_REVIEW_OF_GEO_THERMAL_SOLAR_ASSISTED_HEAT_PUMPS.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2014.

STARKE, A. R. **Uma análise de Sistemas de Aquecimento de Piscinas Domésticas Através de Bombas de Calor Assistidas por Energia Solar**. 2013. 200 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/106981>>. Acesso em: 08 mar. 2014.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. S. **Refrigeração Industrial**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2002.

TRINDADE, E. Energia solar vira fonte de renda no sertão baiano. **Folha de São Paulo**, 18 nov. 2013. Disponível em <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2013/11/1372709-sol-vira-fonte-de-renda-no-sertao-baiano.shtml>>. Acesso em: 12 mar. 2014.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2003.

APÊNDICE – Dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar para Banho e Piscina

A.1 – Banho

O método adotado para o dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar é o indicado pela ABNT NBR 15.569:2008. Os dados utilizados no dimensionamento são citados por Quintas Júnior (2013).

Volume de Consumo:

$$V_{consumo} = \sum (Q_{pu} \times t_{pu} \times f_{pu})$$

Onde:

$V_{consumo}$ = Volume de água quente consumido diariamente em m³.

Q_{pu} = Vazão em m³/s.

t_{pu} = Tempo médio em segundos.

f_{pu} = Frequência de uso.

A vazão é de 4,2 l/min, o tempo médio de utilização é 10 minutos e o total de 144 banhos diários. Portanto, tem-se:

$$V_{consumo} = 4,2 \times 10^{-3} \times 10 \times 144$$

$$V_{consumo} = 6,048 \text{ m}^3$$

Sistema de Armazenamento:

$$V_{armaz.} = \frac{V_{consumo} \times (T_{consumo} - T_{ambiente})}{T_{armaz.} - T_{ambiente}}$$

Onde:

$V_{\text{armaz.}}$ = Volume de água armazenado em m^3 (sugerido 75% do volume de consumo).

T_{consumo} = Temperatura de uso. Sugerido 45°C .

T_{ambiente} = Temperatura média anual. Para São Paulo, adotado 22°C .

$T_{\text{armaz.}}$ = Temperatura de armazenamento. ($T_{\text{armaz.}} > T_{\text{consumo}}$).

Portanto:

$$4,536 = \frac{6,048 \times (45 - 22)}{T_{\text{armaz.}} - 22}$$

$$T_{\text{armaz.}} = 52,67^\circ\text{C}$$

Demanda de Energia Útil:

$$E_{\text{útil}} = V_{\text{armaz.}} \times \rho \times c_p \times (T_{\text{armaz.}} - T_{\text{ambiente}})$$

Onde:

ρ = massa específica da água igual a 1000 kg/m^3 .

c_p = calor específico da água igual a $11,63 \times 10^{-4} \text{ kWh/kg}^\circ\text{C}$.

Portanto:

$$E_{\text{útil}} = 4,536 \times 1000 \times 11,63 \times 10^{-4} \times (52,67 - 22)$$

$$E_{\text{útil}} = 161,8 \text{ kWh/dia}$$

Cálculo da área coletora:

$$A_{\text{coletora}} = \frac{(E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}) \times FC_{\text{instal}} \times 4,901}{PMDEE \times I_G}$$

Onde:

A_{coletora} = é a área coletora em m^2 .

I_G = é o valor da irradiação global média anual para o local de instalação, expresso em kWh/m^2 . Para São Paulo o valor corresponde a $3,85 \text{ kWh/m}^2$.

E_{perdas} = perdas térmicas nos circuitos, expresso em kWh/dia (sugerido 15% da energia útil).

PMDEE = é a produção média diária de energia específica do coletor solar, expressa em kWh/m², calculada através da equação:

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

Onde:

$F_R \tau \alpha$ = coeficiente de ganho do coletor solar (adimensional). Para o coletor selecionado vale 0,73.

$F_R U_L$ = coeficiente de perdas do coletor solar (adimensional). Para o coletor selecionado vale 4,511. Portanto:

$$PMDEE = 4,901 \times (0,73 - 0,0249 \times 4,511)$$

$$PMDEE = 3,03 \text{ kWh/m}^2$$

FC_{instal} = fator de correção para a inclinação e orientação do coletor solar dado pela equação:

$$FC_{\text{instal}} = \frac{1}{1 - [1,2 \times 10^{-4} \times (\beta - \beta_{\text{ótimo}})^2 + 3,5 \times 10^{-5} \times \gamma^2]}$$

(para $15^\circ < \beta < 90^\circ$)

Onde:

β = inclinação do coletor em relação ao plano horizontal, expressa em graus (°).

$\beta_{\text{ótimo}}$ = inclinação ótima do coletor para o local de instalação, expressa em graus (°). Sugere-se que seja adotado o valor de módulo da latitude + 10°.

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

Como a instalação em questão não possui desvio em relação ao norte geográfico e o ângulo de inclinação dos coletores coincide com o ângulo de instalação ótimo ($\beta = \beta_{\text{ótimo}}$), o fator de correção da instalação é 1.

Portanto:

$$A_{coletora} = \frac{(161,8 + (0,15 \times 161,8)) \times 1 \times 4,901}{3,03 \times 3,85}$$

$$A_{coletora} = \frac{911,9291}{11,6655}$$

$$A_{coletora} = 78,2 \text{ m}^2$$

Portanto, para atendimento dos chuveiros dos vestiários com energia solar serão necessários 78,2 m² de área coletora, que representam 40 coletores solares planos de 2 m² de área unitária. Apesar de a norma sugerir um armazenamento de 75% do volume consumido diariamente, neste caso não será necessário, visto que o consumo acontece praticamente junto com a produção, reduzindo o volume para 01 reservatório térmico de 1.500 litros. O sistema de aquecimento auxiliar será através de bombas de calor ligadas paralelamente no reservatório térmico.

A.2 – Piscina

O método adotado para o dimensionamento do Sistema de Aquecimento Solar é apresentado por Duffie e Beckman (1980). Os dados utilizados no dimensionamento são citados por Quintas Júnior (2013).

A equação a seguir permite estimar as perdas de calor por evaporação de uma piscina descoberta:

$$q_e = P_a \times \left[35v + 43(T_p - T_{ambiente})^{\frac{1}{3}} \right] \times (\omega_p - \omega_a)$$

Onde:

q_e = Perda de calor por evaporação.

P_a = Pressão atmosférica do local em kPa.

v = velocidade do vento em m/s.

T_p = Temperatura da piscina.

$T_{ambiente}$ = Temperatura ambiente.

ω_p = umidade de saturação à temperatura da piscina em kg de vapor d'água/kg de ar seco.

ω_a = umidade do ar a temperatura ambiente.

Para estimar as perdas de calor por convecção, utiliza-se a equação a seguir:

$$q_c = q_e \times 0,0006 \times \left(\frac{T_P - T_{ambiente}}{\omega_P - \omega_a} \right)$$

Utilizando-se destas equações, a estimativa de perda de calor da piscina é de 24.021 W. Como a piscina será coberta durante o período de não utilização, a energia útil será 1.037,8 MJ/dia.

Para o cálculo da área coletora, será considerado o valor médio de irradiação solar para a cidade de São Paulo, no valor de 14 MJ/(m²·dia) e, segundo as tabelas de eficiência energética do Inmetro, o rendimento do coletor de polipropileno da Prosol é de 71,5%.

$$A_{coletora} = \frac{E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}}{I_G \times \eta_{col}}$$

Onde:

$A_{coletora}$ = é a área coletora em m²;

E_{perdas} = perdas térmicas nos circuitos, expresso em MJ/dia (sugerido 15% da energia útil);

I_G = é o valor da irradiação global média anual para o local de instalação, expresso em MJ/(m²·dia). Para São Paulo o valor corresponde a 14 MJ/(m²·dia);

η_{col} é o rendimento do coletor solar selecionado.

$$A_{coletora} = \frac{1.037,8 + 0,15 \times 1.037,8}{14 \times 0,715}$$

$$A_{coletora} = \frac{1.193,47}{10,01}$$

$$A_{coletora} = 119,23 \text{ m}^2$$

Portanto, para atendimento da carga térmica da piscina com energia solar serão necessários 120 m² de área coletora.