



**CENTRO UNIVERSITÁRIO RITTER DOS REIS
ÂNIMA EDUCAÇÃO**

GIOVANI ASCULI KSZESINSKI MAINKA

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO POR BOMBAS DE
CALOR PARA UMA PISCINA COBERTA DE CLUBE NA CIDADE DE PORTO
ALEGRE**

Porto Alegre

2024

GIOVANI ASCULI KSZESINSKI MAINKA

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO POR BOMBAS DE
CALOR PARA UMA PISCINA COBERTA DE CLUBE NA CIDADE DE PORTO
ALEGRE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil, do Centro
Universitário Ritter dos Reis, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof.Msc. Carlos Henrique Pereira Assunção Galdino

Porto Alegre

2024

GIOVANI ASCULI KSZESINSKI MAINKA

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO POR BOMBAS DE
CALOR PARA UMA PISCINA COBERTA DE CLUBE NA CIDADE DE PORTO
ALEGRE.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Ritter dos Reis.

_____, _____ de _____ de 2024.

Prof. e orientador

Prof. Carlos Henrique Pereira Assunção Galdino, MsC
Centro Universitário Ritter dos Reis

AGRADECIMENTOS

À minha família, dedico estas palavras de gratidão por todo o apoio, compreensão e amor incondicional ao longo desta jornada. Vocês foram a base sólida que me sustentou nos momentos de dificuldade e a inspiração que me impulsionou a nunca desistir dos meus objetivos.

Ao meu filho, Heitor, minha maior motivação e razão de tanto esforço. Cada sorriso seu me trouxe a força necessária para continuar, mesmo nos dias mais difíceis. Este trabalho é também para você, como um exemplo de que com dedicação e perseverança podemos alcançar nossos sonhos.

Com todo o meu amor, muito obrigado!

RESUMO

O presente estudo aborda o dimensionamento de um sistema de aquecimento por bombas de calor para uma piscina coberta em um clube em Porto Alegre, RS, destacando sua relevância para o uso contínuo e eficiente do espaço durante todas as estações. Considerando as variações climáticas locais e a necessidade de manter a temperatura da água em níveis confortáveis, a pesquisa visa encontrar a configuração ideal para atender às demandas térmicas, minimizando custos operacionais e impactos ambientais. O objetivo geral é desenvolver um sistema eficiente e economicamente viável para o aquecimento da piscina, capaz de manter uma temperatura de 28°C durante o ano todo. A metodologia combina levantamento de dados meteorológicos com visitas in loco para medir o volume da piscina e avaliar a estrutura disponível. Foram aplicadas equações termodinâmicas para calcular o calor necessário, considerando perdas por radiação, convecção e evaporação. Os resultados demonstraram que a instalação de seis bombas de calor com potência de 160.000 BTU/h atende de forma eficiente às demandas de aquecimento. A modularidade do sistema permite ajustes automáticos conforme a temperatura ambiente, reduzindo o consumo energético em períodos de menor demanda. Conclui-se que o sistema proposto garante conforto térmico, eficiência energética e viabilidade econômica, proporcionando uma solução sustentável e adequada às necessidades do clube, com potencial de aplicação em contextos similares.

Palavras-chave: Aquecimento de piscina, bomba de calor, eficiência energética, dimensionamento.

ABSTRACT

This present study focuses on designing a heat pump heating system for an indoor swimming pool at a club in Porto Alegre, Brazil, aiming to enable year-round usage while maximizing energy efficiency. Considering local climate variations and the need to maintain comfortable water temperatures, the research seeks to identify the optimal configuration to meet thermal demands while minimizing operational costs and environmental impact. The primary objective is to develop an efficient, economically viable heating system capable of sustaining a consistent temperature of 28°C throughout the year. The methodology combines meteorological data analysis with on-site visits to measure pool volume and evaluate existing infrastructure. Thermodynamic equations were applied to calculate the necessary heating load, accounting for heat losses through radiation, convection, and evaporation. The results indicated that installing six heat pumps with a capacity of 160,000 BTU/h each would efficiently meet the pool's heating requirements. The modular system allows for automatic adjustments according to ambient temperature, reducing energy consumption during periods of lower demand. In conclusion, the proposed system ensures thermal comfort, energy efficiency, and economic viability, offering a sustainable and suitable solution for the club's needs and potentially for similar contexts.

Key words: Pool heating, heat pump, energy efficiency, system design.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	9
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	9
1.2.1 Objetivo Geral	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
1.3 JUSTIFICATIVA.....	10
1.4 DEFINIÇÃO OPERACIONAL DAS VARIÁVEIS	11
1.5 METODOLOGIA DO TRABALHO	11
1.6 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	11
1.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	12
2 BOMBAS DE CALOR	14
2.1 HISTÓRIA DO DESENVOLVIMENTO DA BOMBA DE CALOR.....	16
2.2 BOMBAS DE CALOR AR-ÁGUA (AIR-TO-WATER)	19
3 METODOLOGIA	21
3.1 PERÍODO DE UTILIZAÇÃO	23
3.2 CUSTOS OPERACIONAIS	24
3.2.1 CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA	24
3.2.2 CUSTO DE MANUTENÇÃO	25
3.2.3 EQUAÇÃO GERAL DO CALOR.....	26
3.4 CALOR NECESSÁRIO PARA O AQUECIMENTO DO VOLUME TOTAL	27

3.5 PERDA DE CALOR POR RADIAÇÃO.....	27
3.6 PERDA POR EVAPORAÇÃO	30
3.7 EQUAÇÃO GERAL FINAL.....	31
3.8 LEVANTAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS	31
3.9 TEMPERATURA.....	33
3.10 VELOCIDADE DO VENTO	34
3.11 UMIDADE RELATIVA.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 CALOR NECESSÁRIO	36
4.2 PERDA DE CALOR POR RADIAÇÃO.....	36
4.3 PERDA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	37
4.4 PERDA POR EVAPORAÇÃO	38
4.5 EQUAÇÃO GERAL FINAL.....	39
4.6 DIMENSIONAMENTO	39
4.6.1 CONVERSÃO DE UNIDADE	40
4.6.2 DEFINIÇÃO DE EQUIPAMENTO	42
5 CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A possibilidade de desfrutar da piscina durante todas as estações do ano, mesmo nos dias frios, tornou-se viável com a introdução de aquecedores para elevar a temperatura da água. Sensores integrados ao sistema de controle monitoram constantemente a temperatura da água, garantindo que o aquecedor entre em funcionamento quando necessário e desligue quando a temperatura desejada for alcançada. Os métodos de aquecimento mais comuns incluem sistemas elétricos, a gás, solares e de trocadores de calor. Embora haja uma variedade de aquecedores disponíveis, todos compartilham um sistema hidráulico e um controle de temperatura que operam de maneira similar.

Com a demanda de se instalar um sistema de aquecimento para o aquecimento de uma piscina coberta de um clube na cidade de porto alegre (RS) e levando em consideração que De acordo com ASHRAE (2007), a temperatura ideal para banho varia de acordo com a atividade fim a ser desenvolvida, e também, para manter um meio que não seja favorável a proliferação de microrganismos que causem doenças, além de manter a limpeza. Para se manter o fluxo de usuários no local o ano inteiro e conseqüentemente a economia do local funcionando, foi solicitado a instalação de um sistema que atenda as necessidades do local de implementação.

O Brasil é o segundo país que mais constrói piscinas no mundo, atrás apenas dos Estados Unidos, segundo dados da Associação Nacional dos Fabricantes, Construtores de Piscinas e Produtos Afins (ANAPP, 2017). O estudo aqui abordado tem como objetivo também demonstrar o método correto de se dimensionar um sistema de aquecimento para uma piscina abordando métodos e equações que permitam se chegar a um dimensionamento correto e eficiente de um sistema que atualmente não temos muitas pesquisas relacionadas ao tema bombas de calor, que é um sistema de fácil aplicação e que gera muitos benefícios.

Bombas de calor apresentam uma alternativa muito interessante pois se trata de um equipamento eficiente que transferem calor em vez de gerá-lo, usando eletricidade apenas para operar o compressor e os outros componentes do sistema. Isso as torna uma opção mais econômica em comparação com aquecedores elétricos tradicionais as bombas de calor são consideradas uma opção ambientalmente amigável, pois não emitem gases de efeito estufa diretamente durante o processo de aquecimento. No entanto, é importante considerar fatores como o clima local e o tamanho da piscina ao escolher uma bomba de calor, pois esses fatores podem afetar sua eficiência e desempenho.

Para assegurar condições ideais, é essencial que o sistema de aquecimento da piscina atenda à demanda térmica, embora isso possa implicar em custos operacionais significativos em determinados casos. Dentre os sistemas frequentemente empregados para essa finalidade, incluem-se aquecedores elétricos, aquecedores a óleo ou gás, aquecedores solares e bombas de calor. Ao compará-los, observa-se que os dois primeiros têm um impacto ambiental mais expressivo e uma eficiência reduzida, além de demandarem uma quantidade substancial de combustível por unidade de potência de aquecimento, resultando em custos operacionais elevados. Embora os aquecedores solares apresentem uma eficiência menor, esse aspecto é compensado pelo baixo custo de operação.

No que diz respeito às bombas de calor, estas oferecem um custo operacional reduzido, uma vez que não funcionam por meio da conversão direta de energia elétrica em energia térmica. Em vez disso, esses dispositivos transferem energia de um reservatório térmico de baixa temperatura para um de alta temperatura, requerendo uma entrada de energia, geralmente elétrica, devido à natureza não espontânea dessa transferência. Devido às características do ciclo de compressão de vapores que definem as bombas de calor, o efeito de aquecimento é de 3 a 5 vezes maior do que o consumo de energia elétrica necessário para seu funcionamento (STARKE, 2013). Isso explica o baixo custo operacional das bombas de calor, que podem resultar em uma economia de energia superior a 50% em comparação com outras alternativas, conforme destacado por Starke (2013).

Um sistema de aquecimento de piscinas adequadamente dimensionado deve manter a temperatura desejada, mesmo diante das condições mais adversas do local onde está instalado. Ao mesmo tempo, o sistema deve oferecer potência térmica suficiente para evitar longos períodos de funcionamento contínuo.

Manter o conforto do utilizador e a eficiência energética é de extrema importância quando se trata do sistema de aquecimento. O funcionamento prolongado do sistema de aquecimento pode levar a despesas operacionais mais elevadas e acelerar o desgaste dos seus componentes, reduzindo, em última análise, a sua vida útil. Assim, encontrar um equilíbrio entre a capacidade de aquecimento e as necessidades térmicas da piscina é crucial para alcançar um desempenho ideal e econômico. Isto requer considerações meticulosas de design que abrangem as características da piscina, o ambiente circundante, os padrões de utilização e as condições climáticas locais.

O uso adequado de estratégias que ajudem na eficiência do projeto são de extrema importância como o uso de capa térmica para reduzir a perda de calor durante o período em que a piscina não está sendo utilizada isso impacta diretamente na eficiência do sistema. Este

trabalho está dividido e organizado em três partes principais. Sendo que na primeira parte será mostrado um panorama geral sobre o sistema escolhido será exposto as vantagens e desvantagens do sistema escolhido para o projeto e uma explicação do funcionamento do equipamento escolhido para este projeto.

Para a segunda parte vai ser evidenciado todos os dados do levantamento que precisar ser feito in loco com base nos dados coletados, utilizaremos equações termodinâmicas fundamentais para determinar a demanda de calor da piscina. Isso incluirá considerações sobre perdas de calor, taxa de evaporação da água e variações sazonais nas condições climáticas. Temos também como base técnica a NBR 10339: 2018 Cada etapa do processo de cálculo será explicada em detalhes, desde a determinação da massa de água da piscina até a estimativa da diferença de temperatura entre a água desejada e o ambiente. também uma prevê explicação de como é feita a captação dos dados metrológicos pertinentes ao dimensionamento em questão.

Por fim, na terceira parte do trabalho, apresentaremos o dimensionamento completo realizado ao longo do projeto. Destacaremos os valores e pontos-chave dos cálculos realizados, proporcionando uma compreensão clara do processo de seleção e dimensionamento da bomba de calor mais adequada para este projeto específico. Considerações sobre o rendimento e eficiência da bomba de calor serão discutidas, visando garantir uma escolha que aperfeiçoe o desempenho e a eficácia do sistema de aquecimento da piscina.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Com a necessidade de se manter em operação e gerando economia durante todo o ano se chegou a demanda para o aquecimento de uma piscina coberta de um clube localizado na cidade de porto alegre (RS)

Com essa proposta qual seria o dimensionamento correto para um sistema de aquecimento por bombas de calor para uma piscina coberta para uso de um clube na referida localidade utilizando-se bombas de calor?

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Este trabalho possui objetivos geral e específicos, abaixo detalhados.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como finalidade analisar um sistema de aquecimento por bombas de calor para uma piscina coberta de um clube localizado na cidade de porto alegre (RS), onde o sistema contará com bombas de calor que forneçam o calor para o volume de água de modo que se aqueça a piscina em um determinado espaço de tempo.

1.2.2 Objetivos Específicos

O dimensionamento adequado do sistema tem como objetivo:

- Dimensionar a temperatura para atingir os limites normativos;
- Analise da temporalidade da aplicação do sistema de bombas de calor para o período do inverno;
- Analise econômica do processo de aquecimento;

1.3 JUSTIFICATIVA

Visando o uso da piscina no inverno da cidade de porto alegre, rio grande do sul e o fato da temperatura da água ser próxima da temperatura ambiente e o local de implementação apresentar baixas temperaturas no inverno, causando desconforto ao usuário foi considerado pelo clube a implementação de uma piscina aquecida coberta, para o uso dos sócios no inverno um sistema aquecido poderia estender o uso pelo ano inteiro sendo assim movimentando ainda que no inverno a economia do clube, o que está proposto comercialmente para este caso é a implementação de bombas de calor pois em comparação de custo de operação a bomba de calor diante das outras fontes de aquecimento As vantagens primárias da utilização de uma bomba de calor incluem: economia de energia entre 50% e 70%, redução significativa nas emissões de CO₂ e eliminação ou redução drástica no consumo de combustível segundo Agência Internacional de Energia (AIE).

O uso de bombas de calor se da ao fato do espaço físico limitado a baixa complexidade de instalação do sistema e a garantia de aquecimento mesmo em dias nublados e chuvosos, o dimensionamento executado nesse trabalho contribuirá para o meio acadêmico com o detalhamento de equações e pontos importantes do dimensionamento para se chegar a potência correta das bombas de calor que atualmente está pouco difundido na comunidade em geral gerando economia e bem estar para o usuário. O sistema de aquecimento adotado nesse

estudo está cada vez mais entrando no mercado nacional por sua alta eficiência e como uma alternativa verde para o processo.

1.4 DEFINIÇÃO OPERACIONAL DAS VARIÁVEIS

Para este projeto de dimensionamento consideram-se as seguintes variáveis:

- a) temperatura do ambiente;
- b) temperatura de projeto;
- c) tempo de aquecimento;
- d) vazão;
- e) Eficiência;
- f) Custo;

1.5 METODOLOGIA DO TRABALHO

Com o propósito de alcançar os objetivos do estudo para dimensionamento, o tema foi desenvolvido com duas bases. Em uma das abordagens foram utilizadas fontes bibliográficas como livros, artigos científicos e publicações em revistas, que serviram como fontes para o referencial teórico.

A segunda etapa foi realizada através de visitas em campo, para entender a demanda com conversa com o cliente sobre o uso desejado para seu investimento seguido de medição de volume, localização da implementação, estruturas existentes e pré posicionamento das novas.

1.6 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Esta pesquisa está delimitada a execução de dimensionamento de um sistema de aquecimento para uma piscina coberta de um clube localizado na cidade de Porto Alegre (RS). O período de projeto foi dos meses de janeiro de 2023 a abril de 2023 com visitas e reuniões no local de projeto com a equipe técnica e os contratantes para se atingir o melhor resultado, o dimensionamento está pautado para o uso de aquecimento por meio de bombas de calor, a piscina conta com um volume total de 480 mil litros de água que será mantida a uma temperatura de 28°C durante o ano inteiro.

Para este dimensionamento serão apontadas todas as equações necessárias para se chegar potência requerida de bombas de calor para se obter o melhor desempenho e economia possível para o sistema.

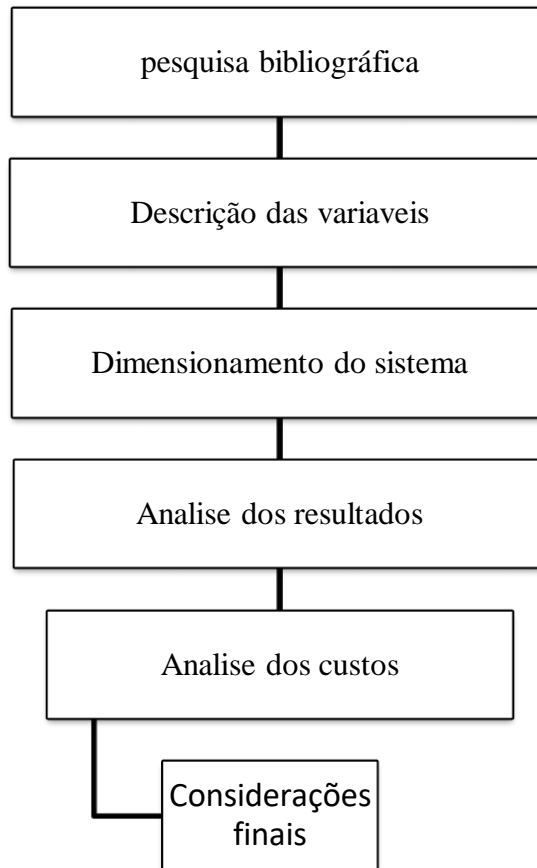
1.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Com base no organograma apresentado na Figura 1, o presente trabalho obedecerá às seguintes etapas de desenvolvimento:

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Descrição das variáveis;
- c) dimensionamento do sistema;
- d) Análise dos resultados;
- e) Análise dos custos;
- f) Considerações finais.

Para guiar o desenvolvimento do trabalho, foi elaborado um organograma que organiza cada etapa da pesquisa. Essa estrutura sistematiza as ações a serem realizadas, desde a revisão bibliográfica até a análise dos custos, garantindo que o estudo atenda aos objetivos propostos de maneira clara e organizada, conforme expõe a figura 1:

Figura 1 - Organograma da pesquisa



Fonte: Autor, 2024.

O organograma acima ilustra de forma sequencial as etapas do estudo, facilitando a compreensão do fluxo de trabalho. Esse delineamento permite um acompanhamento detalhado de cada fase do projeto, assegurando a coesão do processo de pesquisa e a consistência dos resultados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta um sistema de bomba de calor, detalhando suas principais características, vantagens e desvantagens no contexto de aquecimento de piscinas. Esse tipo de sistema se destaca por ser híbrido, operando de forma semelhante a um ar-condicionado no sentido de que transfere calor do ambiente externo para a água da piscina, em vez de gerá-lo diretamente. No processo de aquecimento, o sistema utiliza um ventilador para captar o ar ambiente e conduzi-lo para dentro de uma serpentina que contém um gás especial fornecido por um compressor. Durante essa etapa, o ar cede calor para o gás, que, em seguida, passa por um trocador de calor, transferindo sua energia térmica para a água da piscina.

Embora o sistema funcione por meio de energia elétrica, o calor fornecido à água provém majoritariamente do ar, o que o caracteriza como um sistema híbrido e energeticamente eficiente. As bombas de calor se destacam nesse aspecto, pois são capazes de fornecer mais calor do que a quantidade de energia elétrica consumida. Isso se deve ao fato de que elas transferem o calor de uma fonte externa para o ambiente a ser aquecido, em vez de gerar calor diretamente, como ocorre em sistemas de aquecimento elétrico convencionais. Dessa forma, o uso de uma bomba de calor pode resultar em economia significativa de energia, reduzindo os custos operacionais ao longo do tempo, apesar de seu investimento inicial ser mais elevado.

Outro aspecto a ser considerado é o tamanho compacto da bomba de calor, o que facilita sua instalação. No entanto, esse equipamento é frequentemente descrito como barulhento, especialmente durante o funcionamento do compressor e do ventilador. Por essa razão, recomenda-se que ele seja instalado em uma área externa e protegida, onde o ruído gerado não interfira no conforto dos usuários do ambiente.

Além disso, as bombas de calor modernas geralmente incluem controles e tecnologias avançadas projetadas para otimizar sua eficiência e desempenho. Entre esses recursos, encontram-se termostatos programáveis, sensores de temperatura e tecnologias de monitoramento remoto, que permitem aos usuários acompanhar o funcionamento do sistema e ajustar suas configurações de acordo com as necessidades. Essas inovações não apenas aumentam a eficiência energética do equipamento, mas também facilitam sua operação e manutenção, contribuindo para a longevidade do sistema.

A construção de uma bomba de calor convencional é relativamente simples, composta por componentes essenciais que trabalham de forma integrada para realizar a transferência de

calor. Entre esses componentes, destaca-se o compressor, cuja função é aumentar a pressão do refrigerante, elevando sua temperatura para possibilitar a troca de calor. O condensador, por sua vez, é onde o refrigerante libera o calor para o ambiente externo. Em seguida, a válvula de expansão regula o fluxo do refrigerante, e o evaporador é responsável por absorver o calor do ambiente interno. Para distribuir o calor, o sistema pode utilizar radiadores para o aquecimento central ou dutos de ar em sistemas de ar condicionado, permitindo a transferência de calor de maneira eficiente e controlada. Esses componentes trabalham em sincronia, assegurando a eficácia e o funcionamento apropriado da bomba de calor, proporcionando o conforto térmico desejado com eficiência energética.

Na sequência, a Figura 1 ilustra o sistema de bomba de calor, evidenciando cada um dos componentes e etapas do processo descrito, para facilitar a compreensão visual do funcionamento desse equipamento ao longo do capítulo.

Figura 1 – bomba de calor



Fonte Heliotek (2018)

É importante observar que o uso de bombas de calor tem se expandido no mercado devido à sua eficiência energética e ao impacto positivo que proporciona em relação ao consumo de energia. Comparado a sistemas de aquecimento tradicionais, como os elétricos diretos ou a gás, a bomba de calor utiliza o calor do ambiente, reduzindo significativamente o custo energético mensal. Esse fator é especialmente relevante em instalações de uso contínuo, como em piscinas de uso público ou residencial de alto padrão, onde o controle de temperatura é uma prioridade.

Além da economia de energia, outro benefício fundamental desse sistema é o baixo impacto ambiental. Como a bomba de calor não queima combustível para gerar calor, a emissão de poluentes é reduzida, contribuindo para uma operação mais limpa. Este é um

ponto de destaque, especialmente em tempos onde a sustentabilidade é um tema central nas escolhas de infraestrutura. Sistemas de bomba de calor são, portanto, uma escolha consciente para empresas e residências que buscam aliar conforto térmico à responsabilidade ambiental.

Por outro lado, as bombas de calor apresentam certas limitações que devem ser consideradas. Uma delas é o desempenho em condições climáticas extremas. Em locais com temperaturas muito baixas, a eficiência do sistema pode diminuir, já que a fonte de calor ambiental se torna insuficiente para fornecer o aquecimento necessário. Embora existam modelos com sistemas de backup elétrico para esses cenários, o custo adicional de operação pode reduzir parte da economia inicialmente prevista.

Por fim, o avanço da tecnologia tem permitido que novos modelos de bomba de calor incluam funcionalidades extras, como sistemas de controle inteligente e automação. Com esses recursos, é possível programar o sistema para funcionar em horários de menor custo energético, monitorar a temperatura à distância e realizar ajustes automáticos conforme a necessidade de aquecimento, otimizando ainda mais a eficiência e tornando o uso da bomba de calor mais conveniente e acessível para o usuário final.

2.1 História do desenvolvimento da bomba de calor

A história da bomba de calor remonta a 1824, quando Nicolas Carnot investigou a relação entre trabalho e calor em sistemas térmicos. Carnot elucidou que, enquanto o trabalho pode ser totalmente convertido em calor, o oposto não é verdadeiro; nem todo o calor pode ser transformado em trabalho útil (PASSOS, 2003). A partir desse princípio, ele sugeriu que, em teoria, um ciclo de motor térmico poderia ser revertido, operando assim como uma bomba de calor. Essa ideia, revolucionária para a época, estabeleceu as bases para o desenvolvimento futuro de tecnologias de transferência de calor, como o sistema de bomba de calor que conhecemos hoje.

Após cerca de três décadas, avanços começaram a ser feitos no estudo e no desenvolvimento prático de bombas de calor. O físico e engenheiro britânico Lord Kelvin, em meados do século XIX, foi um dos primeiros a explorar a aplicação desse conceito de forma prática, visando especificamente o aquecimento de ambientes. Conforme relata Banks (2008), Kelvin foi pioneiro ao descrever uma bomba de calor que poderia utilizar o calor latente do ar ambiente para aquecer espaços interiores, conceito que representou um marco na engenharia térmica.

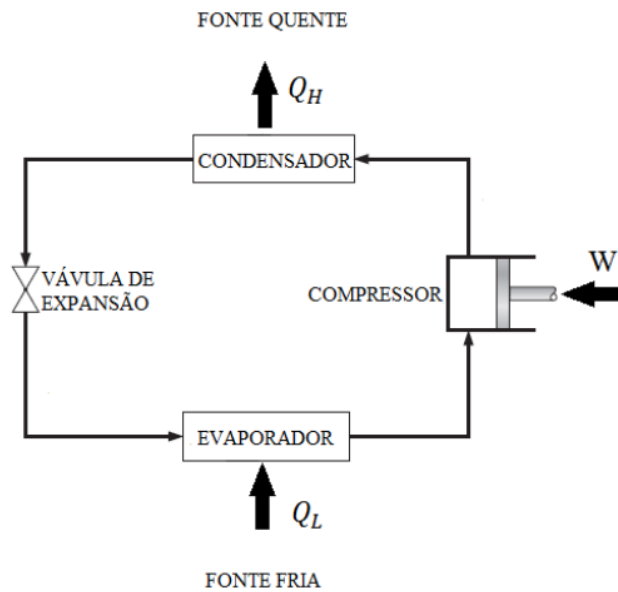
A ideia de Kelvin, contudo, só foi concretizada em forma de dispositivo prático após muitos anos. Em 1928, 104 anos depois da teoria inicial de Carnot, desenvolveu-se a primeira bomba de calor que utilizava o processo de compressão de um fluido refrigerante para aquecer não apenas o ar, mas também a água (BANKS, 2008; ZOGG, 2008; HEPBASLI; KALINCI, 2009). O fluido refrigerante utilizado nesse sistema pioneiro foi a amônia, que, apesar de tóxica, possuía um desempenho eficiente para a transferência de calor. Esse avanço foi decisivo, pois a tecnologia passou a ser aplicável em diversos setores, especialmente em regiões onde a calefação era necessária para garantir o conforto térmico.

Com o passar dos anos, o desenvolvimento das bombas de calor continuou em ritmo crescente, atingindo o ápice da popularidade no início do século XXI. Em 2007, o número de unidades instaladas globalmente ultrapassou a marca de 140 milhões, destacando o produto como uma alternativa amplamente aceita para aquecimento e climatização em residências e estabelecimentos comerciais (LAZZARIN, 2007). Esse crescimento na adoção das bombas de calor impulsionou a pesquisa por tecnologias mais avançadas e sustentáveis, particularmente no que diz respeito aos fluidos refrigerantes. A busca por alternativas menos prejudiciais ao meio ambiente intensificou-se, dado que muitos dos gases utilizados inicialmente, como o CFC, contribuíam significativamente para o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio.

Atualmente, os refrigerantes mais comuns são os hidrofluorcarbonetos (HFCs), que, embora menos agressivos à camada de ozônio, ainda apresentam potencial de aquecimento global. Com isso, a pesquisa científica se voltou para alternativas como os hidrocarbonetos, dióxido de carbono (CO_2) e amônia, substâncias que reduzem o impacto ambiental e buscam oferecer maior eficiência energética (SAND, 2010). Segundo Hepbasli e Kalinci (2009), o uso de CO_2 como refrigerante, embora exija sistemas de alta pressão, apresenta menor potencial de aquecimento global e vem sendo cada vez mais investigado em aplicações comerciais.

O princípio de funcionamento das bombas de calor por compressão, representado na Figura 2, demonstra o ciclo de compressão do refrigerante. Nesse processo, o fluido refrigerante é comprimido, aumentando sua temperatura e pressão. Em seguida, ele passa por um condensador, onde libera calor para o ambiente externo ou para a água, dependendo da finalidade do sistema (SOUZA; SANTOS, 2015). Ao passar pela válvula de expansão, o refrigerante tem sua pressão reduzida e entra no evaporador, onde absorve calor do ar ambiente, reiniciando o ciclo.

Figura 2- ciclo de compressão



Fonte: Lazzarin(2007)

A Figura 2 ilustra o funcionamento de uma bomba de calor no ciclo de compressão, destacando as etapas pelas quais o refrigerante passa para realizar a transferência de calor. Esse ciclo, além de eficiente, é a base tecnológica de diversos sistemas de climatização e aquecimento de água. A simplicidade estrutural, combinada com a eficiência energética, torna as bombas de calor uma opção atraente para usuários domésticos e industriais que buscam reduzir custos operacionais e impactos ambientais (ZOGG, 2008).

Um dos fatores que impulsionaram a popularidade das bombas de calor é a versatilidade. Elas são aplicáveis em diversos contextos, como aquecimento de piscinas, calefação residencial, refrigeração e até mesmo na indústria alimentícia, onde o controle de temperatura é fundamental (HEPBASLI; KALINCI, 2009). Esse sistema oferece uma solução prática e adaptável a diferentes necessidades, sendo uma opção econômica para o longo prazo.

Ainda que a tecnologia tenha evoluído significativamente, as bombas de calor enfrentam desafios, especialmente em regiões de clima muito frio. Em temperaturas abaixo de zero, a eficiência do sistema pode ser comprometida, pois a fonte de calor externa se torna limitada. Para contornar essa limitação, alguns sistemas incluem aquecedores elétricos de suporte, garantindo o funcionamento do sistema mesmo em condições climáticas adversas (BANKS, 2008).

Por fim, o avanço nas tecnologias de automação tem permitido que bombas de calor modernas incorporem sistemas de controle remoto e automação inteligente, como sensores de temperatura e cronogramas programáveis. Isso oferece ao usuário um controle maior sobre o

funcionamento do sistema, além de garantir uma operação mais econômica e personalizada, adaptando o aquecimento às necessidades específicas do ambiente (SOUZA; SANTOS, 2015).

2.2 Bombas de Calor Ar-Água (Air-to-Water)

O sistema de aquecimento por bombas de calor é cada vez mais reconhecido pela sua eficiência energética e pela contribuição para a redução das emissões de carbono. Diferente dos sistemas convencionais, que geram calor a partir de combustíveis fósseis, as bombas de calor transferem calor de uma fonte fria para uma fonte quente, o que reduz significativamente o consumo de energia. Segundo *HeatPump Technology* de Pearson (2011), essa tecnologia permite aquecer ambientes e fornecer água quente sanitária com uma eficiência que pode ser de três a quatro vezes maior do que a dos aquecedores convencionais, dependendo do coeficiente de performance (COP).

Feng et al. (2015) destacam em suas pesquisas que as bombas de calor ar-água são especialmente eficientes para climas moderados, onde a variação de temperatura permite um melhor aproveitamento da tecnologia. Esses sistemas são capazes de funcionar eficientemente sem depender diretamente da queima de combustíveis, o que os torna uma alternativa sustentável em termos de consumo energético e emissão de poluentes. Embora sua eficácia possa ser limitada em climas extremamente frios, onde o COP tende a diminuir, ainda assim são soluções viáveis para reduzir o consumo de energia.

Ao considerar o dimensionamento e a escolha de uma bomba de calor, aspectos como a carga térmica e o COP são fundamentais. Moran e Shapiro (2013), em *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, ressaltam que o desempenho de uma bomba de calor depende diretamente dessas características e das condições climáticas do local de instalação. O COP, que representa a eficiência do sistema, varia conforme o clima, e sistemas dimensionados de forma inadequada podem resultar em desperdício de energia e baixo desempenho.

Para um melhor aproveitamento das bombas de calor, é essencial que o dimensionamento siga as especificações do fabricante e considere as necessidades térmicas do ambiente. Feng et al. (2015) sugerem que fatores como a exposição solar, o isolamento térmico do edifício e o uso de aquecimento complementar sejam considerados no planejamento, pois influenciam diretamente na eficiência energética do sistema.

Além da eficiência energética, as bombas de calor são valorizadas pelo seu potencial de integração com fontes de energia renováveis, como energia solar e eólica. Estudos de

IRENA (2013) indicam que a combinação com sistemas fotovoltaicos, por exemplo, pode aumentar a sustentabilidade do aquecimento doméstico. Na União Europeia, essa tecnologia é classificada como renovável, em parte devido à sua capacidade de utilizar o calor ambiente como fonte primária de energia, tornando-se uma solução estratégica para reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

A utilização de bombas de calor tem sido incentivada globalmente através de políticas públicas e subsídios. Nos Estados Unidos, Reino Unido, Austrália e Japão, há incentivos fiscais e programas de financiamento para a aquisição desses sistemas, como mencionado em estudos de *HeatPump Market Report* (2017). Essas políticas incentivam a adoção de tecnologias verdes e reduzem os custos iniciais, tornando-as mais acessíveis para residências e empresas.

Os custos iniciais de instalação de uma bomba de calor são frequentemente apontados como um obstáculo, mas análises de longo prazo mostram que esses sistemas podem oferecer um retorno significativo em economia de energia. Feng et al. (2015) apontam que, com o uso adequado, a economia em relação aos sistemas tradicionais de aquecimento pode compensar os custos iniciais em poucos anos, especialmente em áreas com tarifas elevadas de energia elétrica.

No contexto ambiental, as bombas de calor também ajudam a reduzir a pegada de carbono das edificações. Como observado por Pearson (2011), essas tecnologias emitem significativamente menos CO₂ quando comparadas a sistemas que utilizam combustíveis fósseis, contribuindo para que edifícios se alinhem a metas de sustentabilidade. Em projetos de construção ecológica, as bombas de calor são cada vez mais comuns como uma medida eficaz para alcançar padrões de eficiência e sustentabilidade.

O uso de bombas de calor em grandes edificações, como hotéis e hospitais, também tem sido objeto de estudo. Moran e Shapiro (2013) observam que esses sistemas são altamente vantajosos em aplicações comerciais, onde a demanda por aquecimento e água quente é constante e o potencial de economia energética se torna ainda mais relevante. A integração de sistemas de bomba de calor com o controle inteligente de energia também maximiza a eficiência e facilita a gestão de consumo.

3 METODOLOGIA

O trabalho apresenta as equações necessárias para se determinar a potência necessária dos equipamentos para o aquecimento do volume de água proposto e custo de operação, o objetivo final é chegar ao dimensionamento correto das bombas de calor observando todas as características relevantes desse sistema.

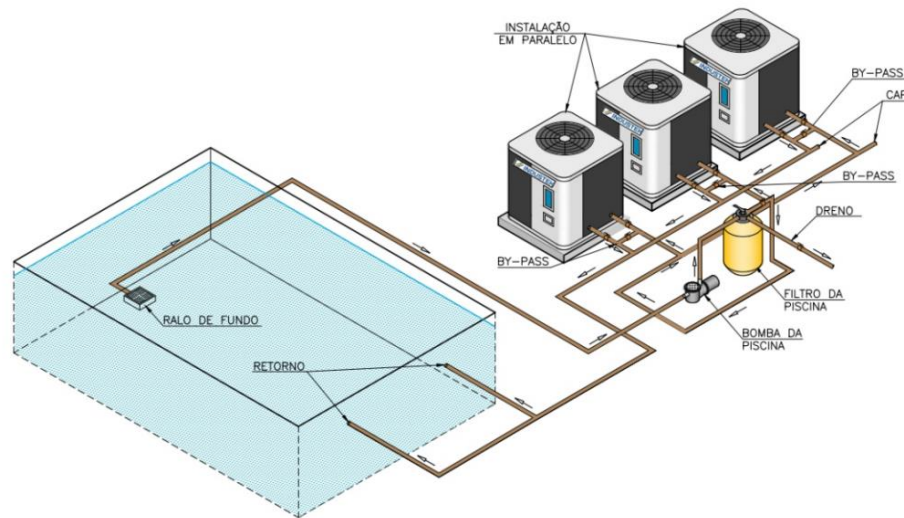
A piscina em análise para a implementação do sistema de aquecimento por meio de bombas de calor está situada em Porto Alegre, RS, uma região conhecida por suas variações climáticas extremas ao longo do ano. O complexo de piscinas do clube possui áreas externas de recreação, espaços de lazer equipados com churrasqueiras e amplas áreas que se destacam pela excelente localização às margens do rio Guaíba. A piscina foco do nosso estudo é coberta por uma estrutura metálica e possui fechamentos laterais em alvenaria. Ela foi construída em concreto armado, impermeabilizada com manta asfáltica, e seu revestimento é feito de elegantes pastilhas cerâmicas, garantindo tanto funcionalidade quanto estética.

Com dimensões de 10 metros de largura, 30 metros de comprimento e 1,5 metros de profundidade, esta piscina possui um impressionante volume total de 480 mil litros de água. Destinada ao uso recreativo, a temperatura da água idealmente deve ser mantida em 28 °C. Segundo as diretrizes da ASHRAE (2007), a faixa de temperatura recomendada para piscinas de uso recreativo varia entre 24 °C e 29 °C, proporcionando um ambiente confortável e agradável para os usuários. Essa atenção às especificações não só garante o bem-estar dos frequentadores, mas também otimiza a experiência de lazer na instalação.

Característica conhecida do local de implementação é de temperaturas baixas nos meses de inverno em 2023 teve uma média diária mensal mínima em 13,3°C e a média das temperatura máximas em 22,8°CINMET (2023) o que inviabilizaria o uso nessa estação, o sistema precisara compensar essas oscilações de temperatura anual e manter durante todo o ano a temperatura em seu nível alvo.

Abaixo na figura 3 exemplifica a instalação de bombas de calor em piscina.

Figura 2- esquema de instalação



Fonte: Industek (2022).

Após a análise estrutural da piscina e das condições climáticas da região, o trabalho se concentra nas equações necessárias para determinar a potência exigida das bombas de calor para aquecer o grande volume de água. Esse cálculo considera variáveis como as perdas de calor para o ambiente, a eficiência do sistema de bombeamento e a capacidade de recuperação de temperatura ao longo do ano. O dimensionamento correto, considerando esses fatores, garante que o sistema seja capaz de atingir e manter a temperatura desejada de 28 °C, independentemente das variações sazonais.

Outro ponto relevante na análise é o cálculo do custo operacional do sistema, que leva em conta tanto a potência demandada quanto o tempo de operação diária da bomba de calor. Com o auxílio das fórmulas de rendimento energético e das especificações técnicas do fabricante, é possível estimar o consumo de energia elétrica, fator que impacta diretamente nos custos mensais do clube. Este cálculo permite projetar o custo anual e avaliar a viabilidade financeira do sistema de aquecimento no longo prazo.

Em relação à escolha das bombas de calor, é fundamental observar a adequação do sistema ao clima local, especialmente considerando as variações de temperatura em Porto Alegre. Durante os meses de inverno, a baixa temperatura ambiente exige que o sistema funcione com uma potência de aquecimento mais alta para compensar o frio externo, situação que pode comprometer o COP (Coeficiente de Performance) do equipamento. Portanto, a

escolha de modelos com alta eficiência energética é essencial para garantir um aquecimento estável e econômico.

A manutenção de uma temperatura constante na piscina, independentemente das estações do ano, também demanda atenção especial ao isolamento térmico do ambiente. A estrutura da piscina, com fechamento lateral em alvenaria e cobertura metálica, auxilia na retenção de calor, mas é importante avaliar a necessidade de reforçar o isolamento para reduzir as perdas térmicas durante o inverno. Esta medida reduz a carga sobre o sistema de aquecimento, prolongando a vida útil dos equipamentos e diminuindo o consumo de energia.

3.1 período de utilização

A temperatura da água de uma piscina tende a acompanhar a temperatura do ar ambiente, o que torna o aquecimento essencial para manter a piscina em uma faixa confortável para uso. De acordo com a ASHRAE (2007), a temperatura ideal para piscinas recreativas varia entre 24 °C e 29 °C, garantindo uma experiência agradável para os usuários. Essa faixa de temperatura é particularmente importante para piscinas de uso frequente, onde o conforto térmico contribui para o bem-estar e a segurança dos nadadores. Sem um sistema de aquecimento adequado, a água poderia esfriar rapidamente, especialmente em regiões com invernos rigorosos.

Para atender à demanda de uso durante todo o ano, o sistema de aquecimento da piscina foi projetado para manter a temperatura dentro da faixa recomendada, independentemente das condições climáticas externas. O fato de a piscina ser coberta e isolada ajuda a minimizar as perdas de calor, uma vez que o ambiente fechado reduz a exposição a ventos e variações bruscas de temperatura. Esse isolamento permite que o sistema de aquecimento trabalhe de forma mais eficiente, exigindo menor consumo energético para manter a água aquecida, principalmente nos meses mais frios.

Nos meses de temperaturas mais elevadas, o sistema de aquecimento da piscina poderá ser desativado com maior frequência, pois o calor ambiente contribuirá naturalmente para manter a água dentro da faixa desejada. Essa estratégia de desligamento periódico do sistema, conforme as condições climáticas, contribui para uma economia significativa de energia. Além disso, ao evitar o funcionamento constante do sistema de aquecimento nos meses mais quentes, há uma redução no desgaste dos equipamentos, prolongando a vida útil do sistema.

Esse planejamento de aquecimento intermitente reflete a importância de um gerenciamento energético eficiente para piscinas aquecidas. A utilização de sensores de

temperatura e sistemas de automação pode ajudar a monitorar continuamente a temperatura da água, permitindo ajustes automáticos no funcionamento do sistema. Dessa forma, é possível garantir que a água permaneça sempre aquecida nos meses frios e em temperaturas confortáveis nos meses quentes, sem desperdício de energia.

3.2 Custos operacionais

Os custos operacionais de uma bomba de calor em sistemas de aquecimento de piscinas estão principalmente relacionados ao consumo de energia elétrica. A eficiência do sistema, medida pelo Coeficiente de Performance (COP), desempenha um papel fundamental na determinação desses custos, pois o COP representa a relação entre a quantidade de calor gerada e a energia elétrica consumida. Em geral, sistemas com COP mais elevado requerem menor consumo de eletricidade para alcançar o mesmo nível de aquecimento, o que reduz os custos operacionais. Portanto, escolher um sistema de aquecimento com alta eficiência energética não só oferece economia financeira a longo prazo, mas também contribui para uma operação mais sustentável e com menor impacto ambiental (ASHRAE, 2007).

3.2.1 Custo de energia elétrica

A energia elétrica é o principal componente dos custos operacionais para sistemas de bombas de calor, sendo diretamente influenciado pela capacidade da bomba e pela temperatura da água. Um aumento na demanda de aquecimento, especialmente em meses mais frios, pode elevar o consumo de energia, impactando diretamente o custo mensal de operação. Para sistemas de aquecimento de piscinas, o consumo de eletricidade depende também do isolamento do ambiente e das condições climáticas locais. Em regiões onde há maiores variações de temperatura, o sistema pode exigir ajustes frequentes na operação para manter a piscina na temperatura ideal, o que aumenta o consumo de energia e, conseqüentemente, os custos operacionais.

A eficiência do sistema de aquecimento, além de reduzir os custos operacionais, é um fator crucial para minimizar o impacto ambiental. Segundo Dincer (2002), quanto mais eficiente for um sistema, melhor será a conversão energética, ou seja, mais calor será gerado para a piscina com menor consumo de energia. Esse aspecto não só alivia o custo financeiro para o operador, mas também diminui a pegada de carbono do sistema, promovendo uma abordagem ecologicamente consciente. Adotar bombas de calor com altos índices de COP é

uma estratégia recomendada para reduzir o consumo de eletricidade, especialmente em instalações de grande porte, onde a demanda energética pode ser significativa.

A equação necessária para calcular o consumo de energia é dada por

$$\text{Energia necessária} = \text{demanda de calor} / \text{COP}$$

Para obtermos o custo da energia basta multiplicar o consumo energético em kWh pelo custo local do kW.

3.2.2 Custo de manutenção

A manutenção de sistemas de aquecimento por bombas de calor é essencial para garantir sua eficiência e longevidade. Uma parte importante dessa manutenção é a limpeza mensal dos filtros e serpentinas, que são componentes vitais para o bom funcionamento do sistema. Como destacado por Dincer (2002), filtros sujos e obstruídos comprometem o fluxo de ar e forçam o equipamento a trabalhar com maior intensidade para atingir a temperatura desejada, o que aumenta o consumo de energia e reduz a eficiência geral. Manter esses componentes limpos não apenas ajuda a otimizar o desempenho do sistema, mas também reduz o desgaste dos demais componentes, prolongando sua vida útil.

Além da limpeza dos filtros, é essencial realizar inspeções regulares dos cabos e conexões elétricas. Problemas elétricos podem comprometer significativamente o funcionamento do sistema e reduzir a vida útil do equipamento. Segundo Moran e Shapiro (2013), componentes elétricos mal conectados ou desgastados podem gerar instabilidade no fornecimento de energia, ocasionando falhas intermitentes ou até mesmo curtos-circuitos. A inspeção elétrica garante que o sistema opere com segurança e evita problemas mais graves, que poderiam exigir reparos dispendiosos ou a substituição precoce do equipamento.

A verificação de vazamentos hidráulicos e nas linhas de fluido refrigerante é igualmente crítica para o bom desempenho da bomba de calor. Vazamentos podem reduzir a eficiência energética, pois diminuem a quantidade de fluido refrigerante, afetando a capacidade do sistema de transferir calor de maneira eficaz. Dincer (2002) reforça que a eficiência de um sistema de aquecimento está diretamente ligada à manutenção de seus componentes hidráulicos e à calibração de termostatos, os quais regulam e monitoram as condições de operação. Pequenos vazamentos, se não detectados a tempo, podem se

transformar em problemas maiores, gerando perdas de desempenho e custos elevados para reparos.

Os custos com peças e mão de obra para a manutenção variam conforme a natureza dos problemas e das peças que necessitam ser substituídas. Ter um contrato de manutenção preventiva é uma medida recomendada para reduzir despesas inesperadas e assegurar a longevidade do sistema. Moran e Shapiro (2013) afirmam que a manutenção regular ajuda a evitar falhas prematuras, pois permite que os problemas sejam detectados antes que comprometam o funcionamento do equipamento. Com um plano de manutenção preventiva, o operador pode minimizar paradas não programadas, mantendo o sistema em funcionamento contínuo e eficiente, e reduzindo a necessidade de substituição antecipada.

3.2.3 Equação geral do calor

Após uma análise aprofundada da literatura, foi possível identificar e quantificar as principais fontes de ganho e perda de calor em sistemas de aquecimento para piscinas. De acordo com a ASHRAE (2003), as perdas de calor incluem radiação, convecção e evaporação, enquanto o ganho de calor está diretamente relacionado à radiação global incidente na superfície da piscina. A evaporação, sendo a maior responsável pela perda térmica em piscinas descobertas, representa entre 54% e 69% do total de calor perdido. Em comparação, as perdas por convecção variam de 15% a 21%, e as perdas por radiação representam de 7% a 21%, conforme relatado por Tarrad (2017). Já a condução, devido à baixa transferência de calor através das paredes e do fundo da piscina, contribui com cerca de 5% das perdas térmicas.

Os cálculos de perda de calor por evaporação levam em consideração fatores como a área da superfície da piscina, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, que influenciam diretamente a taxa de evaporação. Segundo ASHRAE (2003), a evaporação é o fator dominante de perda de calor em piscinas descobertas, devido à interação da água com o ar ambiente. Em ambientes onde a ventilação é alta, como piscinas externas expostas ao vento, as taxas de evaporação são ainda mais elevadas, exigindo maior consumo de energia para compensar essa perda.

No caso das perdas de calor por convecção, estas são influenciadas principalmente pela diferença de temperatura entre a água da piscina e o ar ambiente. Tarrad (2017) destaca que a convecção é uma forma significativa de perda de calor, especialmente em locais com temperaturas de ar mais baixas, como durante a noite ou em estações frias. A convecção

aumenta proporcionalmente à velocidade do vento, o que intensifica a troca de calor entre a superfície da piscina e o ambiente externo.

A perda de calor por radiação é outro fator a ser considerado, embora contribua com uma porcentagem menor em comparação à evaporação e convecção. A radiação ocorre quando a piscina emite calor para o ambiente em forma de radiação infravermelha. Esse tipo de perda é mais intenso em piscinas externas durante a noite, quando a temperatura do ar ambiente cai e a radiação infravermelha emitida pela água é maior.

Nos próximos tópicos, serão discutidos os métodos de cálculo específicos para cada uma dessas formas de perda de calor, permitindo uma análise detalhada e fundamentada das necessidades energéticas para manter a temperatura da piscina dentro da faixa desejada.

3.4 Calor necessário para o aquecimento do volume total

Calcularemos a quantidade de energia total que precisaremos para aquecermos o volume total da piscina, sabendo a temperatura mínima média mensal e a temperatura que precisamos atingir podemos fazer o uso da seguinte fórmula (HALLIDAY, 2009)

$$E = M_{\text{água}} \cdot C_{p,\text{água}} \cdot (T_p - T_{\text{mín}}) \quad (1)$$

Onde:

E é a energia necessária para aquecer a piscina (kJ)

$M_{\text{água}}$ é a massa de água na piscina (kg)

$C_{p,\text{água}}$ é o calor específico da água (kJ/kg. °C)

T_p é a temperatura da piscina (°C)

$T_{\text{mín}}$ é a temperatura mínima média mensal (°C)

3.5 Perda de calor por radiação

A perda de calor por radiação é um processo pelo qual um corpo perde energia térmica na forma de ondas eletromagnéticas, geralmente na faixa do infravermelho. Todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto emitem radiação eletromagnética, As perdas de calor através da radiação de onda longa podem ser expressas pela fórmula geral frequentemente utilizada por autores na área de transferência de calor e massa. Por outro lado, os ganhos de calor através da radiação de onda curta são determinados como uma função da absorvidade

da superfície da piscina, conforme abordado por Duffie (2013). Utilizaremos a equação de Stefan-Boltzmann para o cálculo de perda de calor por radiação de ondas longas.

$$Q_{rad} = A_{superior} \cdot \varepsilon_{\acute{a}gua} \cdot \sigma \cdot (T_{pA} - T_{c\acute{e}u}) \quad (2)$$

Onde:

Q_{rad} a taxa de perda de calor por radiação (kW)

$A_{superior}$ a área superior da piscina (m²)

$\varepsilon_{\acute{a}gua}$ o coeficiente de emissividade da água

σ a constante de Stefan-Boltzmann (W/m² · K⁴)

$T_{c\acute{e}u}$ – Temperatura do céu (K)

A equação para se determinar a temperatura do céu ($T_{c\acute{e}u}$) se deu pela fórmula de (Incropera 2007)

$$T_{c\acute{e}u} = \varepsilon_{c\acute{e}u}^{0,25} \cdot T_{amb,m} \quad (3)$$

Onde:

$\varepsilon_{c\acute{e}u}$ o coeficiente de emissividade do céu

$T_{amb,m}$ a temperatura ambiente média (K)

Para determinar a emissividade do céu ($\varepsilon_{c\acute{e}u}$), de acordo com Incropera (2007), a seguinte equação deve ser empregada:

$$\varepsilon_{c\acute{e}u} = 0,742 + 0,0062 \cdot T_{po} \quad (4)$$

Em que:

T_{po} é a temperatura do ponto de orvalho (K)

A temperatura mencionada é determinada com base na umidade relativa do ar (UR), de acordo com Incropera (2007).

$$T_{po} = T_{amb,m} - \frac{100-UR}{5} \quad (5)$$

Onde:

UR é a umidade relativa (%)

3.7 perda de calor por convecção

A convecção térmica ocorre em líquidos e gases como um meio de propagação de calor. Esse processo se caracteriza pela transferência de calor através de correntes circulares de convecção, que surgem devido às variações de densidade nos fluidos causadas por mudanças de temperatura.

O coeficiente de difusão está intimamente relacionado com a velocidade do ar acima da superfície, conforme determinado por constantes empíricas. A equação fundamental é derivada de Incropera (2007):

$$Q_{conv} = h_{conv} \cdot A_{superior} \cdot (T_p - T_{amb,m}) \quad (6)$$

Onde:

Q_{conv} a taxa de perda de calor por condução (kW)

h_{conv} o coeficiente de convecção (m/s)

De acordo com o Australian Standard (1989), esse coeficiente é calculado usando a seguinte equação:

$$H_{conv} = 3,1 + 4,1 \cdot var,c \quad (7)$$

Onde:

A velocidade do ar corrigida para a superfície da piscina é representada var,c , e é medida em metros por segundo (m/s).

Sendo que tal correção, segundo Kalogirou (2014), para locais abertos, é:

$$var,c = 0,3 \cdot var \quad (8)$$

De modo que:

var é medido pela velocidade da corrente de ar a uma altura de 10 metros em relação a superfície (m/s)

3.6 Perda por evaporação

A perda de calor por evaporação ocorre quando um líquido absorve energia térmica do ambiente para mudar o estado líquido para o gasoso (vapor). Durante esse processo, as moléculas na superfície do líquido ganham energia suficiente para escapar e se transformar em vapor, levando energia térmica na forma de calor. Isso resulta em um resfriamento da superfície.

A perda de calor por evaporação em uma piscina coberta é uma característica que ocorre mesmo quando uma piscina está protegida por uma cobertura. Alguns pontos relevantes sobre esse processo, evaporação contínua Mesmo com uma cobertura, a evaporação da água da superfície da piscina continua acontecendo. A cobertura pode reduzir a taxa de evaporação em comparação com uma piscina descoberta, mas não a elimina completamente. O fluxo de calor depende da diferença de pressão de vapor, e seu coeficiente de evaporação é determinado empiricamente e ajustado devido ao uso neste projeto. Segundo Incropera (2007), a taxa de transferência de energia é determinada por:

$$Q_{evap} = h_{evap} \cdot A_{superior} \cdot (P_{v,sat} - P_{v,amb}) \quad (9)$$

Onde:

Q_{evap} a taxa de perda de calor por evaporação (kW)

h_{evap} o coeficiente de evaporação (W/m². Pa)

$P_{v,sat}$ a pressão de vapor saturada, a temperatura média ambiente (kPa)

$P_{v,amb}$ é a pressão de vapor ambiente, a temperatura ambiente (kPa)

A equação usada para se determinar a pressão de vapor ambiente é (INCROPERA, 2007)

$$P_{v,amb} = P_{v,sat} \cdot UR \quad (10)$$

A fórmula corrigida para de determinar o coeficiente de evaporação (ASHRAE, 2003) é:

$$h_{evap} = 0,5 \cdot (0,089 + 0,0782 \cdot var, c) \quad (11)$$

3.7 Equação geral final

Após apresentarmos as equações de perdas de calor pertinentes ao nosso projeto podemos organizar uma equação geral para nosso dimensionamento total de energia requerida em KJ, que ainda transformaremos mais adiante em KW para a escolha do equipamento correto para implementação nesse projeto.

Dada as equações anteriores é possível achar a taxa total de perdas de calor que nada mais é que um somatório.

$$Q_{total} = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_{evap} \quad (12)$$

Agora faremos a soma da nossa taxa total de perda de calor na nossa potência requerida para chegarmos a real potência de consumo para se aquecer a piscina do projeto em estudo que se dapela seguinte equação

$$P_f = Q_{total} + E \quad (13)$$

Onde:

P_f é a potência final

3.8 Levantamento de dados meteorológicos

Para a execução deste projeto, utilizaremos dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que é vinculado ao Ministério da Agricultura e Pecuária. O INMET é responsável pela operação de uma vasta rede de estações meteorológicas distribuídas em todo o território nacional. Essas estações capturam uma variedade de informações climáticas, incluindo temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e precipitação, dados fundamentais para estudos em setores como a agricultura, aviação, navegação, planejamento urbano e gestão de recursos hídricos. Esses dados são essenciais para o dimensionamento preciso de sistemas de aquecimento de piscinas, que dependem da compreensão das condições ambientais locais.

Um aspecto relevante para este estudo é a proximidade do projeto com uma estação meteorológica do INMET. Segundo as diretrizes do instituto, recomenda-se que as análises climáticas utilizem dados de estações localizadas a, no máximo, 50 km de distância do local de implementação, garantindo, assim, a representatividade das condições locais e minimizando margens de erro. No caso deste projeto, essa exigência é atendida, uma vez que a piscina em estudo está situada em Porto Alegre, onde há uma estação meteorológica do INMET na região do Jardim Botânico, identificada como A801. Essa proximidade permite a coleta de dados altamente relevantes e específicos para o dimensionamento do sistema de aquecimento.

O uso dos dados da estação Porto Alegre Jardim Botânico (A801) traz benefícios significativos para a precisão do estudo, uma vez que o clima local influencia diretamente nas necessidades de aquecimento da piscina. Por exemplo, a temperatura média, a amplitude térmica entre o dia e a noite, e as condições de vento são variáveis críticas para o cálculo das perdas e ganhos de calor. Esses fatores afetam diretamente o consumo energético e a eficiência do sistema, reforçando a importância de utilizar dados locais, que refletem as condições reais às quais o sistema estará exposto.

Para este projeto, realizaremos uma análise detalhada dos registros anuais de temperatura, umidade e velocidade do vento obtidos pela estação A801. Esses dados permitirão avaliar o impacto das condições sazonais nas necessidades de aquecimento da piscina. Nos meses de inverno, quando as temperaturas são naturalmente mais baixas, espera-se uma demanda maior de aquecimento, enquanto nos meses de verão, o sistema de aquecimento será utilizado com menor frequência, reduzindo o consumo energético. Assim, os dados anuais servirão para projetar o consumo e otimizar a operação do sistema ao longo das estações.

Além de facilitar o planejamento do consumo energético, os dados fornecidos pelo INMET são fundamentais para prever eventuais variações climáticas extremas que possam impactar o funcionamento do sistema. A ocorrência de ondas de frio, por exemplo, pode exigir ajustes no funcionamento das bombas de calor para compensar a maior perda de calor durante esses eventos. Dessa forma, o monitoramento contínuo dos dados meteorológicos auxilia na implementação de estratégias de ajuste, garantindo a manutenção da temperatura ideal da piscina em qualquer condição.

3.9 Temperatura

Todos os dados coletado são provenientes da estação meteorológica do INMET do estado do rio grande do sul, estação Porto alegre jardim botânico (A801) , A estação meteorológica utiliza termômetros especializados para medir a temperatura, como termômetros de bulbo seco, termômetros de máxima e mínima, e dispositivos eletrônicos como termistores ou termopares para medições mais precisas.

A figura 2 é um gráfico do levantamento anual da estação porto alegre- jardim botânico (A801) que demonstra as temperaturas máximas e mínimas dos meses em (c°).



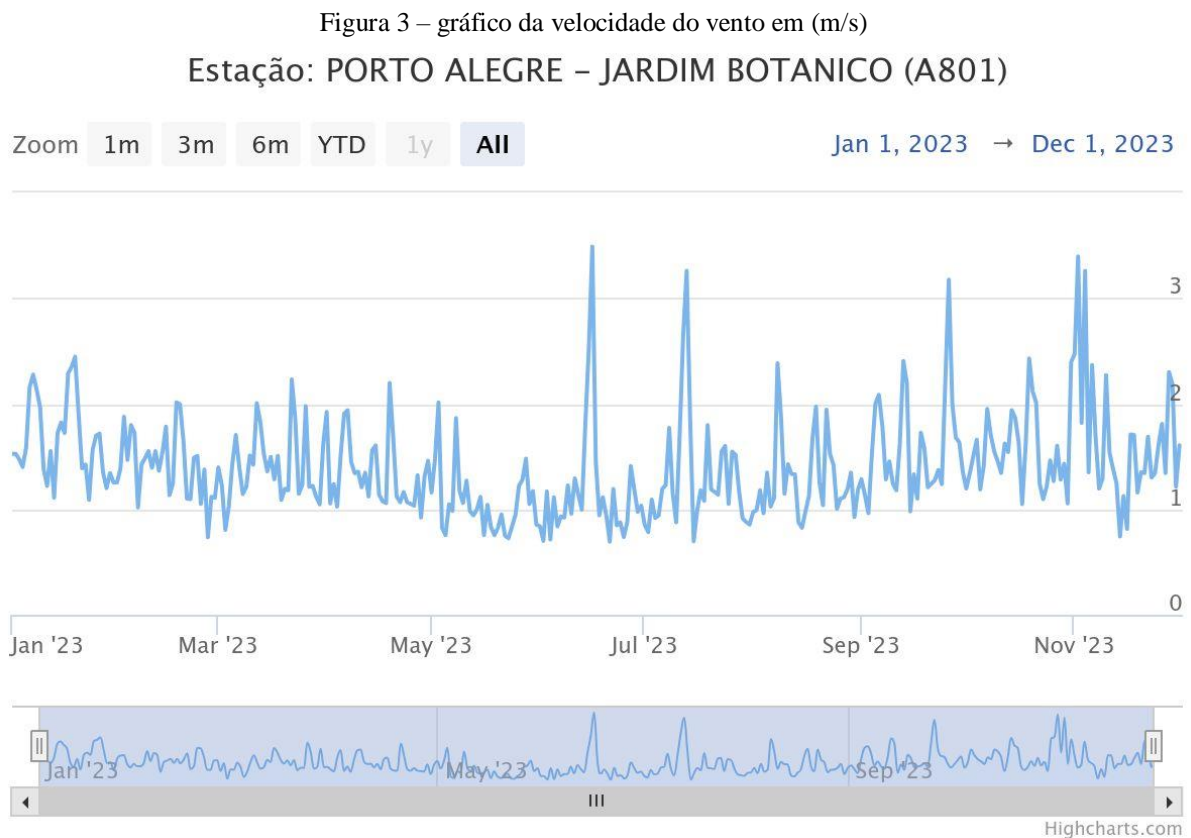
Fonte: – INMET (2024)

A figura 2 servirá de base para nosso dimensionamento pois a temperatura é um dado primordial para esse estudo.

3.10 Velocidade do vento

O levantamento da velocidade do vento em uma estação meteorológica é realizada utilizando anemômetros, dispositivos que convertem o movimento do ar em dados quantitativos de velocidade. Esses dados são fundamentais para diversas aplicações meteorológicas e climatológicas.

A figura 3 é um gráfico do levantamento anual da estação porto alegre- jardim botânico (A801) que demonstra a velocidade dos ventos máxima e mínima em (m/s) dos meses, conforme figura 3:



Fonte: – INMET (2024)

A figura 3 servirá de fonte de dados para o dimensionamento.

3.1.1 umidade relativa

Um dado importante para se ter nosso caso de estudo sobre a perda de calor por evaporação a medição da umidade relativa do ar em uma estação meteorológica é realizada por meio de higrômetros, os quais transformam as condições de umidade do ar em dados quantitativos.

A figura 4 é um gráfico do levantamento anual da estação porto alegre- jardim botânico (A801) que demonstra a umidade relativa em (%) dos meses.



Fonte: – INMET (2024)

A figura 4 servirá de fonte de dados para o dimensionamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Será demonstrado nesse capítulo os resultados obtidos nas equações demonstradas previamente, os cálculos e gráficos obtidos foram gerados com auxílio do software Microsoft Excel.

4.1 Calor necessário

Com os dados necessários devidamente coletados, podemos proceder à aplicação da Eq (1) para determinar o aporte de calor necessário, expresso em kJ, para o aquecimento do nosso volume de água. Essa etapa é fundamental, pois nos permitirá calcular a energia requerida para elevar a temperatura da água da piscina até o nível desejado.

Abaixo segue a tabela 1 a qual traz os valores das variáveis do mês de julho que utilizaremos na equação para determinação do aporte térmico necessário.

Tabela 1 – valores para definição do calor necessário referente ao mês de julho

Variável	Valor
Massa de água na piscina (kg)	478560 kg
Calor específico da água (kJ/Kg. c°)	4,1868 kJ/Kg. c°
Temperatura da piscina (c°)	13,3 c°
Temperatura mínima mensal (c°)	12,3 c° julho

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Após a realização dos cálculos, determinamos que o aporte térmico necessário é de 31451058,91 kJ. Esse valor é fundamental para garantir a eficiência do processo, pois reflete a quantidade de energia térmica requerida para alcançar as condições desejadas.

4.2 Perda de calor por radiação

Para determinarmos a perda de calor gerada por radiação, utilizamos a Equação (2), que descreve como a transferência de calor ocorre devido à emissão de radiação térmica. Esta equação considera fatores essenciais, como a temperatura da superfície, a área exposta e a emissividade do material.

Abaixo segue a tabela 2 a qual traz os valores das variáveis para o mês de julho que utilizaremos na equação de perda de calor por radiação para determinação da perda térmica obtida por radiação.

Tabela 2 – Valores das variáveis para calcular de perda de calor por radiação referente aos meses de julho

Variável	Valor
Área superior da piscina (m ²)	300 m ²
$\varepsilon_{\text{água}}$	0,86
σ a constante de Stefan-Boltzmann	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$
Temperatura piscina (c°)	28 c°
Temperatura do céu (c°)	15,91 c°
Temperatura de ponto de orvalho (c°)	12.04 c°
Umidade relativa (%)	81,56 %
Temperatura ambiente média (c°)	24,6 c°

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Para o mês de julho, analisamos os dados e obtivemos uma taxa de perda de calor por radiação de 8,054 kW. Essa taxa reflete a quantidade de energia térmica que é dissipada por radiação em um determinado sistema

4.3 Perda de calor por convecção

A perda de calor por convecção, conforme descrito na Equação (3), refere-se ao processo de transferência de calor que ocorre quando um fluido em movimento, como ar ou água, interage com uma superfície.

A seguir, você encontrará a Tabela 3, que apresenta os valores das variáveis referentes ao mês de julho. Esses dados são importantes para que possamos calcular a perda de calor por convecção e entender melhor como ocorre a perda térmica nesse processo.

Tabela 3 – valores das variáveis para calcular de perda de calor por convecção referente ao mês de julho

Variável	Valor
Constante da convecção	4,022
Velocidade do ar (m/s)	0,75 m/s
Velocidade do ar corrigida (m/s)	0.225 m/s

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Após realizar os cálculos necessários, obtivemos um valor de perda de calor por convecção de 4,102 kW. Esse valor representa a quantidade de energia térmica que é transferida do sistema para o ambiente circundante devido ao movimento do fluido

4.4 Perda por evaporação

A perda de calor por evaporação, conforme descrito na Equação (4) refere-se ao processo de transferência de calor que ocorre quando um líquido se transforma em vapor. Esse fenômeno é crucial em diversas aplicações, pois a evaporação pode resultar em uma significativa diminuição da temperatura em superfícies expostas.

A seguir, temos a Tabela 4, que traz os valores das variáveis correspondentes ao mês de julho. Esses dados serão essenciais para aplicarmos a equação de perda de calor por evaporação, permitindo que calculemos a perda térmica gerada por esse processo.

Tabela 4 – valores das variáveis para calcular de perda de calor por evaporação referente ao mês de julho

Variável	Valor
Pressão saturada de vapor (kPa)	2,721 kPa
Pressão ambiente vapor (kPa)	2,164 kPa
Constante da evaporação	0.045

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Ao calcularmos, constatamos uma perda de calor por evaporação de 7,519 kW. Essa perda, resultante da transição de fase do líquido para o vapor,

4.5 Equação geral final

Após a realização de todas as equações pertinentes chegamos a equação geral final para determinação da potência requerida para aquecimento do nosso volume total de água durante o mês de julho que é de:

$$\frac{2560189,47}{12 \cdot 3600} + 8,054 + 4,102 + 7,519 = Q_{total}$$

Temos que a potência requerida para aquecimento no mês de julho é de 750 Kw.

4.6 Dimensionamento

Com a potência requerida calculada podemos dar sequência com nosso dimensionamento para encontrarmos o modelo e quantidade adequada para nosso projeto. A primeira etapa será converter nosso valor de kW para btu/h para que por meio de tabelas fornecidas pelos fabricantes possamos encontrar o modelo ideal.

4.6.1 Conversão de unidade

Para convertê-la nossa potencia de kW Para btu/h utilizamos a equação a seguir.

$$KW.3412,142=btu/h$$

$$Btu/h= 2560189,47$$

Quando aplicamos o mesmo cálculo para os demais meses obtemos o seguinte resultado demonstrados a seguir na tabela 5.

Tabela 5 – resultados em btu/h e kW para todos os meses do ano

Mês	Btu/h	KW
Janeiro	1074316,636	315
Fevereiro	1223822,535	359
Março	1026021,997	300
Abril	1868534,913	548
Maio	2143973,757	629
Junho	2047620,293	600
Julho	2560189,47	750
Agosto	2553653,069	747
Setembro	1994628,963	585
Outubro	1997217,344	586
Novembro	1658725,477	486

dezembro	1686980,745	494
----------	-------------	-----

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Ao analisarmos a variação da potência necessária para o aquecimento da piscina ao longo dos meses, identificamos uma flutuação significativa. Essa variação reflete as diferenças sazonais de temperatura e outros fatores ambientais que impactam a perda de calor da piscina. Essa análise detalhada permite compreender o consumo energético e a necessidade de potência em cada época do ano, o que é fundamental para o dimensionamento adequado do equipamento de aquecimento, garantindo eficiência e conforto térmico em todas as estações.

Essa variação mensal é crucial para a escolha de uma bomba de calor que atenda à demanda máxima de aquecimento, especialmente em um projeto de uso contínuo durante o ano todo. Em projetos desse tipo, é essencial considerar o valor de potência mais elevado entre os cálculos mensais, pois isso assegura que a bomba será capaz de atender à demanda nos meses mais frios, quando a necessidade de aquecimento é maior. Ignorar esse ponto poderia resultar em um equipamento subdimensionado, o que comprometeria o desempenho e a eficiência energética do sistema.

Outro ponto importante é a durabilidade e o desempenho da bomba de calor ao longo do tempo. Ao adotar a maior potência calculada, minimizamos o risco de sobrecarga no equipamento, prolongando sua vida útil. Em um sistema subdimensionado, a bomba de calor teria que operar em regimes mais intensos com frequência, o que pode acelerar o desgaste e aumentar a necessidade de manutenção. Portanto, a escolha de um equipamento com capacidade adequada impacta diretamente na confiabilidade do sistema e na economia de custos operacionais a longo prazo.

A seleção da bomba de calor ideal deve ainda levar em consideração o perfil de uso da piscina, que, sendo contínuo, demanda um controle preciso da temperatura da água para atender aos usuários em qualquer época do ano. Essa demanda por um aquecimento constante reforça a importância de adotar a potência máxima estimada. Isso garante que a temperatura da água se mantenha dentro de um intervalo confortável, independentemente das variações climáticas sazonais.

Portanto, com base na variação de potência observada, a decisão de selecionar uma bomba de calor que suporte a maior demanda calculada é a abordagem mais segura e eficaz. Esse critério não só atende às exigências térmicas, mas também contribui para um uso mais

sustentável do sistema, uma vez que permite otimizar o consumo energético e reduzir impactos ambientais associados ao funcionamento prolongado de sistemas de aquecimento.

4.6.2 Definição de equipamento

Sabendo que o mês de julho apresentou a maior potência requerida para o aquecimento do volume total de água, optamos por utilizá-lo como referência para o dimensionamento do sistema. Essa escolha é fundamentada na análise das condições mais desafiadoras para o aquecimento da piscina, garantindo que o sistema seja projetado para funcionar eficientemente mesmo nos períodos de maior demanda. Ao tomar o mês mais crítico como referência, podemos assegurar que a potência necessária será suficiente para atender ao volume total de água com eficiência.

Um conceito fundamental no aquecimento inicial da piscina é o "tempo de primeiro aquecimento". Esse termo se refere ao tempo necessário para que o sistema leve a água da piscina até a temperatura desejada desde o primeiro acionamento. Após cálculos e simulações, definimos que o tempo ideal para o primeiro aquecimento, de modo a equilibrar economia e eficiência, é de 53 horas. Esse valor foi calculado com base na recomendação dos fabricantes, que sugerem que o aquecimento ideal ocorre a uma taxa média de 1 °C a cada 4 horas. Esse limite técnico é uma precaução para evitar sobrecarga dos equipamentos e assegurar uma operação segura e eficiente.

Dado que a potência necessária para o aquecimento da piscina foi calculada em 2560189,47 BTU/h, um valor consideravelmente alto, a melhor estratégia é dividir essa carga em múltiplos equipamentos. A divisão da carga permite melhor controle sobre o consumo de energia e otimiza o desempenho do sistema. Optamos, portanto, por instalar seis bombas de calor, cada uma com uma capacidade de 160.000 BTU/h. Essa configuração proporciona uma potência combinada de 960.000 BTU/h, o que é suficiente para manter o aquecimento em condições ideais e também permite modular o funcionamento das bombas conforme a necessidade de aquecimento em diferentes períodos.

Um aspecto importante a destacar na escolha dos equipamentos de aquecimento é a robustez exigida para operar em condições extremas. Em um sistema projetado para uso contínuo durante todo o ano, é essencial que as bombas de calor sejam selecionadas com base nas situações mais adversas. Esse cuidado garante que o sistema possa enfrentar picos de demanda e variações de temperatura sem comprometer seu funcionamento. As bombas

escolhidas são, portanto, robustas e adequadas para suportar as condições mais críticas que podem ocorrer ao longo do ano.

Além da potência, é importante considerar a variabilidade das temperaturas externas, que flutuam significativamente ao longo dos meses. Essas oscilações influenciam diretamente a eficiência do aquecimento, pois afetam o grau de perda de calor da piscina. Para mitigar os efeitos dessas variações, o sistema foi equipado com sensores de temperatura que monitoram constantemente o ambiente externo e a temperatura da água. Esses sensores fornecem dados em tempo real, permitindo que o sistema ajuste a operação das bombas de forma dinâmica e precisa, adequando-se às condições climáticas momentâneas.

Uma característica interessante das bombas de calor é a possibilidade de operação em cascata. Esse tipo de configuração permite que as bombas aumentem sua potência progressivamente, conforme a necessidade de aquecimento identificada pelos sensores. Em vez de ativar todas as bombas simultaneamente, o sistema inicia com uma única bomba e vai acionando as demais de forma escalonada, até alcançar a temperatura-alvo programada pelo operador. Essa abordagem não apenas otimiza o consumo energético, como também reduz o desgaste dos equipamentos, prolongando sua vida útil e diminuindo a frequência de manutenções.

Após o primeiro ciclo de aquecimento, o sistema entra em um modo de manutenção, no qual a necessidade de ativar todas as bombas diminui. Com base nas leituras dos sensores, o sistema pode manter a temperatura da água com um número menor de bombas em operação, proporcionando um funcionamento mais econômico e sustentável. Esse ajuste automático, orientado pelos sensores, assegura que o sistema use apenas a energia necessária para manter o aquecimento, minimizando desperdícios e contribuindo para uma gestão mais eficiente dos recursos energéticos.

Outro ponto relevante é o efeito do funcionamento escalonado sobre os custos operacionais. A divisão da carga entre várias bombas e o uso da operação em cascata resultam em uma redução significativa no consumo de eletricidade. Isso é especialmente importante em projetos de uso contínuo, onde o consumo energético representa uma parte relevante dos custos operacionais. Ao operar de forma inteligente e somente na potência necessária, o sistema reduz a pressão sobre o orçamento, gerando uma economia expressiva ao longo do tempo.

Além disso, a escolha de múltiplas bombas proporciona uma flexibilidade operacional valiosa. Em caso de falha de um dos equipamentos, o sistema pode continuar funcionando com as bombas restantes, evitando interrupções no aquecimento da piscina. Essa redundância

aumenta a confiabilidade do sistema, garantindo que a temperatura da água permaneça constante e adequada para os usuários mesmo em situações imprevistas. Essa característica é especialmente importante em instalações de grande porte ou em locais com uso contínuo, onde a disponibilidade do aquecimento é essencial.

4.6.3 custo de aquisição e instalação

O custo de aquisição de equipamentos de grande porte desse nível é um pouco elevado inicialmente porém em comparação com outros tipos de aquecimento se torna viável ao passar do tempo se tornando um investimento atrativo uma bomba de calor seja elevado, ela pode gerar economia a longo prazo em relação a outros sistemas de aquecimento, especialmente em locais onde o inverno é rigoroso. Uma bomba de calor eficiente pode reduzir o consumo de energia em até 50%, proporcionando retorno do investimento entre 5 e 10 anos, dependendo do uso e dos custos locais de eletricidade.

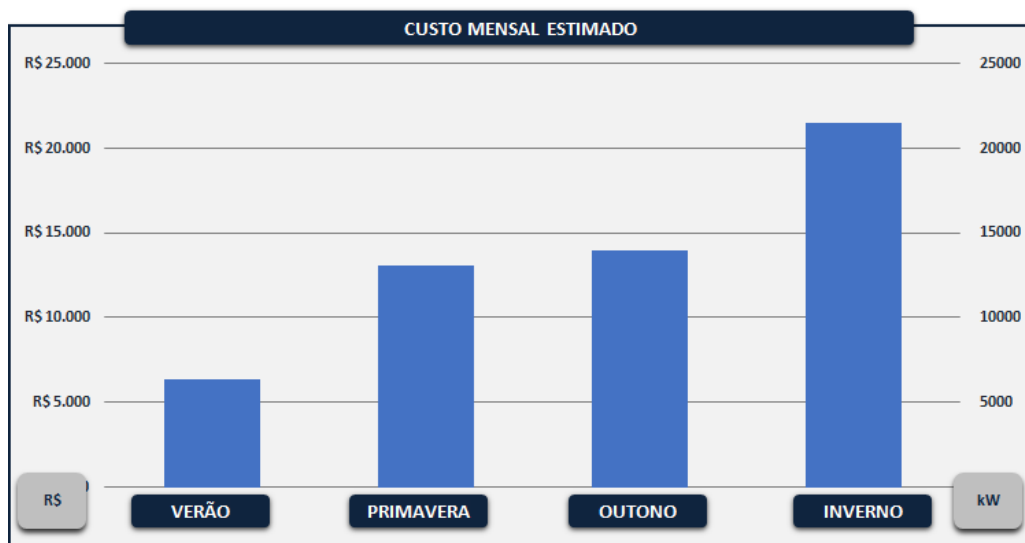
Temos como média hoje no mercado um custo para um equipamento com potência de 160.000 Btu/h em torno R\$30.000,00 unitário, modelos mais eficientes são geralmente mais caros, mas oferecem economia de energia ao longo prazo.

Para o custo de instalação pode variar bastante de região para região e infraestrutura do local, para lugares onde não se tenha deixado em obra esperas para instalação o custo de eleva mais, em média o preço de mercado fica em torno de R\$ 3.000,00 a R\$8.000,00 na região de porto alegre RS.

4.6.4 custo de energético

O custo energético do sistema adotado em nosso estudo com equipamentos de alto rendimento levando em consideração o cálculo térmico necessário se observa que o maior custo será nos meses de inverno chegando a R\$20.000,00, está detalhado abaixo na figura 5:

Figura 5- gráfico de custo mensal



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

4.6.5 custo de manutenção

Manutenções preventivas ajudam a prolongar a vida útil da bomba e a manter sua eficiência energética, evitando reparos mais caros no longo prazo. Eles também garantem que a bomba funcione com um consumo menor de energia, ajudando a economizar na conta de eletricidade.

O custo com manutenção preventiva em bombas de calor é relativamente baixo por se tratar de equipamentos de poucos mecanismos em relação a outros equipamentos de aquecimento porém visitas técnicas para reparos se tornam um pouco mais pesadas pela qualificação que se precisa ter.

Para uma limpeza de serpentinas e filtro que se faz necessário pelo no mínimo a cada 4 meses um valor médio por visita fica entre R\$150,00 a R\$300,00 é altamente recomendado também um chek-up anual com testes de desempenho e ajustes técnicos que fica na média de R\$800,00 a R\$ 1.000,00.

Em casos de manutenção corretiva um chamado técnico custa na média de R\$ 450,00 a R\$650,00 para diagnóstico de defeitos e orçamento,

5 CONCLUSÕES

Após a coleta e análise de dados críticos, incluindo informações meteorológicas detalhadas, dimensões da piscina e o perfil de uso do espaço, o projeto alcançou uma compreensão aprofundada das condições necessárias para um dimensionamento eficiente do sistema de aquecimento. Os dados climáticos locais, fornecidos pela estação meteorológica próxima, foram fundamentais para ajustar o sistema às variações sazonais de temperatura e vento, garantindo que o dimensionamento fosse preciso e que o sistema de aquecimento fosse capaz de manter a temperatura da água ideal durante todo o ano. Esse levantamento de informações garantiu uma abordagem sólida e fundamentada para o cálculo de cada componente.

A análise técnica também revelou o tempo ideal de funcionamento para otimizar a eficiência energética e reduzir custos operacionais. O cálculo mostrou que 53 horas de operação semanal são suficientes para manter a temperatura desejada, ajustando o funcionamento do sistema dentro da curva de potência ideal. Esse período representa um equilíbrio entre o fornecimento de conforto térmico e o consumo racional de energia, promovendo uma operação econômica e sustentável. Essa otimização é essencial para que o sistema funcione com máxima eficiência, especialmente durante os meses de inverno, quando a demanda de aquecimento é mais alta.

A escolha do equipamento também foi uma etapa crucial para o sucesso do projeto. Com base nas especificações de demanda térmica, foi determinado que seis bombas de calor, cada uma com uma potência de 160.000 BTU/h, seriam necessárias para atender às necessidades da piscina. Essa configuração de múltiplas unidades trabalhando em conjunto permite uma operação equilibrada, distribuindo a carga de trabalho e reduzindo o desgaste individual dos equipamentos. Além disso, o sistema modular garante flexibilidade para ajustes de operação, podendo desativar algumas bombas em períodos de menor demanda, como no verão, para economizar energia.

Outro ponto importante do projeto é o conforto e a satisfação dos usuários, aspectos que foram considerados na escolha e configuração do sistema de aquecimento. A temperatura estável e adequada contribui para uma experiência agradável, incentivando o uso da piscina durante todas as estações. Esse aspecto de conforto foi priorizado no dimensionamento, garantindo que o sistema de aquecimento atenda a todas as expectativas de qualidade e bem-estar dos frequentadores, independentemente das condições climáticas externas.

Em conclusão, o dimensionamento final do sistema de aquecimento por bombas de calor atendeu a todos os requisitos levantados no projeto. A integração de dados meteorológicos, cálculos técnicos e uma configuração modular resultou em um sistema eficiente e economicamente viável. Com a instalação das seis bombas de calor de 160.000 BTU/h, o sistema proporciona o conforto térmico necessário para a piscina e atende às demandas de eficiência energética e sustentabilidade. Esse projeto, com base em uma análise rigorosa e detalhada, contribui não apenas para o bem-estar dos usuários, mas também para a redução do impacto ambiental e o uso consciente de recursos energéticos.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE. Handbook – HVAC Applications. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.
- BANKS, David. An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling. Oxford: Wiley-Blackwell, 2008.
- DINCER, I. Thermal Energy Storage: Systems and Applications. 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2002.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- FENG, J.; LI, H.; DENG, S. Performance of air-source heat pumps in cold climates: Evaluation and case study. *Journal of Building Engineering*, 2015.
- HELIOTEK. Catálogo de Bombas de Calor Heliotek 2018. São Paulo: Heliotek, 2018.
- HEPBASLI, Arif; KALINCI, Yusuf. A review of heat pump water heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 6-7, p. 1211-1229, 2009.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- IRENA - International Renewable Energy Agency. Heat pumps: Technology brief. Abu Dhabi, 2013. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 06 nov. 2024.
- LAZZARIN, Renato M. Heat Pumps: A Guide for Use in Heating, Ventilating, and Air Conditioning. *International Journal of Refrigeration*, v. 30, n. 8, p. 1483-1495, 2007.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- PASSOS, Edison B. Máquinas Térmicas: Fundamentos e Aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- PEARSON, A. Heat Pump Technology. London: CRC Press, 2011.
- SAND, James R. Use of Natural Refrigerants in Heat Pumps. *International Journal of Refrigeration*, v. 33, n. 7, p. 1479-1485, 2010.
- SOUZA, Carlos A.; SANTOS, Fernanda R. Tecnologia em Refrigeração e Climatização. 2. ed. São Paulo: Editora Érica, 2015.
- The International Energy Agency. Heat Pump Market Report. 2017. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 06 nov. 2024.
- ZOGG, Michael. Heat Pumps: An Introduction to their Physics, Principles and Applications. 2. ed. New York: Routledge, 2008.