

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO  
CENTRO CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE

THIAGO DOS SANTOS MAIA

**SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A  
IMPLEMENTAÇÃO DE AR-CONDICIONADO EM ÂMBITO HOSPITALAR NA  
CIDADE DE SÃO LUÍS-MA**

São Luís

2025

THIAGO DOS SANTOS MAIA

**SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A  
IMPLEMENTAÇÃO DE AR-CONDICIONADO EM ÂMBITO HOSPITALAR NA  
CIDADE DE SÃO LUÍS-MA**

Dissertação de Mestrado submetida à  
Coordenação do Programa de Pós-  
Graduação em Energia e Ambiente da  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA),  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Energia e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva  
Leite Coelho.

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Bertoldo Junior

São Luís  
2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

dos Santos Maia, Thiago.

SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL  
PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE AR-CONDICIONADO EM ÂMBITO  
HOSPITALAR NA CIDADE DE SÃO LUÍS-MA / Thiago dos Santos  
Maia. - 2025.

103 p.

Coorientador(a) 1: Jorge Bertoldo Junior.

Orientador(a): Paulo Henrique da Silva Leite Coelho da  
Silva Leite Coelho.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em  
Energia e Ambiente/ccet, Universidade Federal do Maranhão,  
São Luís, 2025.

1. Energia Solar. 2. Hospital. 3. Sustentabilidade.  
4. Simulação Energética. I. Bertoldo Junior, Jorge. II.  
da Silva Leite Coelho, Paulo Henrique da Silva Leite

THIAGO DOS SANTOS MAIA

**SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO COMO ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A  
IMPLEMENTAÇÃO DE AR-CONDICIONADO EM ÂMBITO HOSPITALAR NA  
CIDADE DE SÃO LUÍS-MA**

Dissertação de Mestrado submetida à  
Coordenação do Programa de Pós-  
Graduação em Energia e Ambiente da  
Universidade Federal do Maranhão (UFMA),  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Energia e Ambiente.

Aprovado em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva Leite Coelho (Orientador)  
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

---

Prof. Dr. Jorge Bertoldo Junior (Coorientador)  
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

---

Prof. Dr. Jaiver Efrén Jaimes Figueroa  
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

---

Prof. Dr. Alisson Augusto Azevedo Figueiredo  
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Dedico este trabalho a todos que contribuíram de alguma forma para a sua realização.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a algumas pessoas que foram fundamentais na minha jornada acadêmica e pessoal.

A minha mãe, Benedita Santos Maia (*in memoriam*), que sempre me incentivou a vencer os desafios da vida. Sua dedicação e amor incondicional mostraram-me a importância do estudo e da persistência, e sou eternamente grato por cada ensinamento que recebi dela.

A minha tia do coração, Egídia Borges Almeida, cuja presença constante foi um pilar de apoio em minha vida. Seus incentivos, cuidados e atenção foram essenciais na realização das minhas metas, orientando-me na minha caminhada estudantil e profissional.

À minha grande amiga, Raimunda Pereira Martins, que sempre me encorajou a acreditar em meus projetos de vida. Seu apoio foi fundamental para que eu enxergasse as recompensas pelo meu esforço e perseverança.

Agradeço aos professores Jorge Bertoldo Junior e Paulo Henrique Leite Coelho pelo apoio inestimável para o desenvolvimento deste trabalho. Ambos ofereceram orientações metodológicas, enriquecendo a qualidade da pesquisa.

Agradeço ao Hospital Universitário HUFMA pelo suporte e apoio para a realização desta pesquisa, cuja colaboração foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Por último, agradeço à minha amiga Brenda Camila de Souza Monteiro, que me ofereceu apoio e incentivo durante a conclusão deste mestrado profissional. Sua amizade e colaboração foram muito importantes em momentos significativos da minha jornada.

## RESUMO

No âmbito hospitalar, os sistemas de climatização podem garantir o conforto térmico e a qualidade do ar, ambos benéficos para a saúde dos pacientes e para as atividades desempenhadas pela equipe assistencial. Esta pesquisa tem como objetivo geral investigar a viabilidade de implementação de um sistema de climatização sustentável, baseado em energia renovável, para a UTI do HUUFMA, em comparação com um sistema convencional de compressão de vapor mediante a simulação energética de cada proposta. Trata-se de uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e exploratória, que inicialmente identificou a caracterização das propriedades construtivas, termohigrométricas e o posicionamento solar da UTI em relação ao edifício. Para tanto, posteriormente realizou-se o cálculo da carga térmica e a análise energética dos dois sistemas propostos. A simulação de ambos os sistemas considerou a eficiência energética, a demanda de energia e o impacto ambiental. Os resultados demonstraram que o cálculo da carga térmica total foi de 67,86 kW (19,3 TR), que corresponde ao potencial de demanda de remoção de calor necessário para o funcionamento da UTI. A partir dessa demanda, a simulação energética do *chiller* por compressão de vapor indicou um consumo de 732,96 kWh/dia, com uma capacidade de refrigeração de 87,92 kW (ou 25 TR) e um coeficiente de performance de 2,88 para um funcionamento de 24 horas. Enquanto a simulação energética de um *chiller* por absorção foi de 246.093,80 kWh/ano, com uma capacidade de refrigeração de 88 kW (ou 25 TR) e um coeficiente de performance de 0,70 para um funcionamento de 6 horas. Conclui-se que o sistema de climatização *chiller* por absorção tem potencial para substituir o sistema de compressão de vapor em períodos de alta demanda por resfriamento, o que contribui para a redução da emissão de CO<sub>2</sub> por sua atividade.

**Palavras-chave:** energia solar; hospital; simulação energética; sustentabilidade.

## ABSTRACT

In the hospital setting, air conditioning systems can ensure thermal comfort and air quality, both beneficial for the health of patients and for the activities carried out by the healthcare team. The general objective of this research is to investigate the feasibility of implementing a sustainable air conditioning system, based on renewable energy, for the ICU at HUUFMA, in comparison with a conventional vapor compression system, through the energy simulation of each proposal. This is an applied research with a quantitative and exploratory approach, which initially identified the characterization of the constructive, thermohygrometric properties, and the solar positioning of the ICU in relation to the building. Subsequently, the thermal load calculation and energy analysis of both proposed systems were performed. The simulation of both systems considered energy efficiency, energy demand, and environmental impact. The results showed that the total thermal load calculation was 67.86 kW (19.3 TR), corresponding to the heat removal demand required for the ICU operation. Based on this demand, the energy simulation of the vapor compression chiller indicated a consumption of 732.96 kWh/day, with a refrigeration capacity of 87.92 kW (or 25 TR) and a coefficient of performance of 2.88 for a 24-hour operation. Meanwhile, the energy simulation of an absorption chiller was 246,093.80 kWh/year, with a refrigeration capacity of 88 kW (or 25 TR) and a coefficient of performance of 0.70 for a 6-hour operation. It is concluded that the absorption chiller air conditioning system has the potential to replace the vapor compression system during periods of high cooling demand, contributing to a reduction in CO<sub>2</sub> emissions due to its activity.

**Keywords:** solar energy; hospital; energy simulation; sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Sistema de resfriamento solar elétrico.....                                    | 25 |
| Figura 2 – Sistema de resfriamento térmico solar .....                                    | 26 |
| Figura 3 – Coletor solar de placas planas.....  | 33 |
| Figura 4 – Coletor solar cilíndrico parabólico.....                                       | 34 |
| Figura 5 – Coletor solar cilíndrico parabólico composto .....                             | 35 |
| Figura 6 – Coletor solar linear Fresnel.....  | 36 |
| Figura 7 – Coletor cilíndrico parabólico.....   | 38 |
| Figura 8 – Ciclo básico por absorção.....   | 40 |
| Figura 9 – Sistema de refrigeração solar .....  | 42 |
| Figura 10 – Diagrama esquemático do sistema de refrigeração por compressão de vapor ..... | 43 |
| Figura 11 – Compressão de vapor com energia fotovoltaica.....                             | 44 |
| Figura 12 – Fluxo de funcionamento do resfriador de líquido.....                          | 46 |
| Figura 13 – Resfriador de líquido modelo WFC-S ( <i>Yazaki</i> ) .....                    | 47 |
| Figura 14 – Modelagem 3 D do edifício da UTI .....  | 57 |
| Figura 15 – Vista superior UTI adulto do HUUFMA.....                                      | 60 |
| Figura 16 – Modelagem 3D da UTI do HUUFMA .....   | 62 |
| Figura 17 – Redução de área de demanda energética.....                                    | 76 |
| Figura 18 – Comparação de potência e COP entre os dois <i>chillers</i> .....              | 84 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> . dia].....           | 29 |
| Tabela 2 – Dados ambientais da temperatura de São Luís .....                       | 53 |
| Tabela 3 – Taxa de calor liberada por pessoas .....                                | 54 |
| Tabela 4 – Taxa de dissipação de calor pela iluminação .....                       | 55 |
| Tabela 5 – Taxa de dissipação de calor de equipamentos médicos .....               | 55 |
| Tabela 6 – Condições recomendadas para ambientes hospitalares .....                | 56 |
| Tabela 7 – Carga térmica de insolação da UTI .....                                 | 63 |
| Tabela 8 – Carga térmica de calor gerado por pessoas .....                         | 64 |
| Tabela 9 – Carga térmica de equipamentos e iluminação .....                        | 66 |
| Tabela 10 – Carga térmica decorrente da vazão de ar externo.....                   | 66 |
| Tabela 11 – Carga térmica total.....   | 68 |
| Tabela 12 – Simulação energética para o <i>chiller</i> de compressão de vapor..... | 73 |
| Tabela 13 – Dados do coletor solar do tipo evacuado SFB305818 .....                | 79 |
| Tabela 14 – Simulação energética para o <i>chiller</i> por absorção .....          | 80 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 – Tecnologias de refrigeração ..... | 24 |
|--|----|

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| ANEEL  | Agência Nacional de Energia Elétrica   |
| ANVISA | Agência Nacional de Vigilância Sanitária   |
| ASHRAE | Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento e Refrigeração e Ar-condicionado |
| AVAC   | Aquecimento, ventilação e ar-condicionado  |
| CFCs   | Refrigerantes à base de clorofluorcarbonetos                                       |
| CIESOL | Centro de Pesquisa em Energia Solar  |
| COP    | Coefficiente de Performance  |
| CPC    | Coletores Parabólicos Compostos  |
| Ebserh | Rede de Pesquisa da Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares                    |
| EPE    | Empresa de Pesquisa Energética   |
| GEP    | Gerência de Ensino e Pesquisa  |
| GHI    | Irradiação Global Horizontal   |
| HFCs   | Hidrofluorcarbonetos   |
| HUUFMA | Hospital Universitário do Maranhão   |
| IEA    | Agência Internacional de Energia   |
| INPE   | Instituto de Pesquisas Espaciais   |
| IPCC   | Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas                                |
| kWh    | Quilowatt-hora   |
| LFR    | Coletores Lineares de Fresnel  |
| ODS    | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável   |
| OMS    | Organização Mundial da Saúde   |
| PAG    | Potencial de aquecimento global  |
| PDC    | Coletores Parabólicos  |
| PTC    | Coletores de Calha Parabólica  |
| PV     | Painéis Fotovoltaicos  |
| SI     | Sistema Internacional de Medidas   |
| TBS    | Temperaturas de Bulbo Seco   |
| TBU    | Temperatura de Bulbo Úmido   |
| U      | Coefficientes de Transmitância Térmica   |
| UA     | Umidade Absoluta   |
| UTI    | Unidade de Terapia Intensiva   |

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>13</b> |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....  | <b>16</b> |
| 2.1 OBJETIVO GERAL .....  | 16        |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 16        |
| <b>3 JUSTIFICATIVA</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | <b>20</b> |
| 4.1 SISTEMAS DE ARREFECIMENTOS .....  | 20        |
| 4.2 ENERGIA SOLAR .....   | 27        |
| 4.3 TECNOLOGIAS DE REFRIGERAÇÃO SOLAR.....  | 30        |
| 4.3.1 Coletor Solar.....  | 31        |
| 4.3.2 Ciclo de Refrigeração.....  | 38        |
| 4.3.2.1 <i>Ciclo por absorção</i> .....   | 39        |
| 4.3.2.2 <i>Ciclo convencional de compressão de vapor</i> .....                          | 43        |
| 4.4 RESFRIADORES DE LÍQUIDO .....   | 45        |
| 4.5 FLUÍDO REFRIGERANTE .....   | 50        |
| 4.6 BOMBAS MECÂNICAS.....   | 51        |
| 4.7 CARGA TÉRMICA DE AMBIENTES.....   | 52        |
| <b>5 METODOLOGIA</b> .....  | <b>57</b> |
| <b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | <b>59</b> |
| 6.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO EDIFÍCIO .....                                      | 59        |
| 6.2 CONDIÇÕES TERMOHIGROMÉTRICAS.....   | 59        |
| 6.3 POSICIONAMENTO DA EDIFICAÇÃO EM RELAÇÃO AO SOL .....                                | 60        |
| 6.4 CARGA TÉRMICA TOTAL DOS AMBIENTES DA UTI.....                                       | 61        |
| 6.4.1 <b>Caracterização do Calor Decorrente da Insolação</b> .....                      | <b>61</b> |
| 6.4.2 <b>Caracterização do Calor Gerado por Pessoas</b> .....                           | <b>64</b> |
| 6.4.3 <b>Caracterização do Calor Dissipado pelos Equipamentos e Iluminação</b> ...      | <b>65</b> |
| 6.4.4 <b>Caracterização do Calor Proveniente de Ar Externo</b> .....                    | <b>66</b> |
| 6.4.5 <b>Carga Térmica Total do Ambiente</b> .....                                      | <b>67</b> |
| 6.5 PROPOSTAS DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO.....  | 69        |
| 6.5.1 <b>Proposta do <i>Chiller</i> por Compressão de Vapor</b> .....                   | <b>69</b> |
| 6.5.2 <b>Proposta de um Sistema Sustentável <i>Chiller</i> por Absorção</b> .....       | <b>75</b> |
| 6.5.3 <b>Comparativo entre o <i>Chiller</i> de Absorção e Compressão de Vapor</b> ..... | <b>83</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>7 CONCLUSÃO .....</b>                                     | <b>89</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                      | <b>90</b>  |
| <b>ANEXOS .....</b>  | <b>100</b> |
| <b>ANEXO A – PARECER DE AUTORIZAÇÃO DA INSTITUIÇÃO .....</b> | <b>100</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, diante do crescimento populacional acelerado e do evidente avanço industrial, tem-se observado um aumento na demanda por recursos energéticos e a adesão inadequada dos seus modelos de consumo. Esse contexto tem sido preponderante para o aumento da poluição ambiental, para o esgotamento dos recursos naturais e um declínio acelerado das reservas de combustíveis fósseis, o que apresenta um desafio significativo para a paisagem energética e ambiental (Mahmoudi *et al.*, 2024).

Em caráter mundial, as políticas energéticas obtiveram notoriedade na agenda dos governos e dos gestores, tornando-se um tema relevante para os debates sobre sustentabilidade ambiental, tendo em vista o aquecimento global, o risco de esgotamento de fontes não renováveis, o crescimento *per capita* do consumo de energia e à dependência global sobre os combustíveis fósseis (Oliveira *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a concepção de um edifício sustentável deve contemplar a redução do seu consumo energético, considerando as energias incorporadas e as emissões de CO<sub>2</sub> durante os processos industriais. A título de exemplo, a instalação de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) em edifícios consome uma quantidade significativa de energia (Calcedo; Neves; Fernandes, 2021).

Os edifícios domésticos, comerciais e de serviços são responsáveis pelo maior consumo de energia, assim como os hospitais, que também são considerados consumidores potenciais. Os ambientes hospitalares, enquanto prestadores de atendimento à saúde, devem estar preparados para oferecer uma gama diversificada de serviços de saúde 24 horas por dia (Mahmoudi *et al.*, 2024).

Atrelado à questão ambiental e ao aumento global da temperatura, verifica-se que o ar-condicionado desempenha um papel relevante na sociedade moderna devido ao conforto térmico e à qualidade do ar. Em locais onde as altas temperaturas e a umidade são predominantes, o uso do ar-condicionado é fundamental para prevenir a exaustão pelo calor e a desidratação, benéfico para a saúde e o bem-estar humano.

A utilização dos sistemas de refrigeração e ar-condicionado tem sido debatida pela literatura, de modo que se tem investigado os efeitos dos sistemas de AVAC para a saúde humana. Essas pesquisas demonstraram que a implementação de sistemas AVAC pode facilitar a recuperação dos pacientes na esfera hospitalar e aprimorar a eficácia dos procedimentos de saúde (Martínez; Poveda, 2022).

Desse modo, investir em tecnologias sustentáveis de ar-condicionado em ambientes hospitalares torna-se cada vez mais relevante, dada a importância dos edifícios hospitalares, que se caracterizam como o segundo tipo comercial de maior consumo de energia no Brasil. Nessa perspectiva, sabendo-se que os hospitais consomem cerca de 10,6% do total de energia do setor comercial, e considerando o cenário dos elevados custos energéticos do país, destaca-se que esse consumo elevado recai sobre as instituições de saúde (Oliveira *et al.*, 2021).

Ao considerar a importância dos sistemas de ar-condicionado para o setor saúde e a relevância da redução dos impactos energéticos e ambientais, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomendou a inclusão de estratégias de gestão da saúde relacionadas à eficiência energética, geração de energia alternativa (por exemplo, fontes de energia renováveis), projetos de edifícios ecológicos, sistemas de transporte e refrigeração (WHO, 2010).

A energia solar destaca-se como uma fonte renovável amplamente adotada devido à sua eficácia comprovada e disponibilidade em diversas aplicações (Rebelo *et al.*, 2024), o que, aliado à possibilidade de integração com os sistemas de resfriamento, surge uma oportunidade chave para a redução do consumo de eletricidade em redes públicas e para o enfrentamento do aquecimento global (Shirazi *et al.*, 2018).

Um sistema de resfriamento solar consiste em utilizar a energia solar incidente em um edifício para a climatização dos espaços ocupados. Essa abordagem é comumente reconhecida como uma alternativa sustentável e ecologicamente viável em relação aos sistemas tradicionais de condicionamento de ar (Kim; Ferreira, 2008).

Dessa forma, a refrigeração é um processo que remove o calor de um ambiente, proporcionando uma redução na temperatura interna. A refrigeração por absorção é uma técnica que utiliza a atração física ou química entre as substâncias para gerar o efeito de resfriamento. Esse sistema tem a capacidade singular de converter energia térmica diretamente em potência de refrigeração (Kim; Ferreira, 2008).

De acordo com os estudos de Mendiburu *et al.* (2023) sobre modelagem termodinâmica para ciclos de refrigeração por absorção alimentados por energia solar realizados em Porto Alegre. A eficácia do ciclo de refrigeração por absorção foi investigada, assim como a sua capacidade de oferecer resfriamento eficiente durante as diferentes estações do ano. A elevada demanda elétrica dos sistemas de ar-

condicionado tradicionais reforça a importância da refrigeração por absorção como uma solução mais sustentável. Dessa forma, enfatizou-se a eficiência energética e o desempenho sazonal, aspectos que são considerados críticos para a sua aplicabilidade em larga escala.

O *chiller* é o equipamento mais utilizado para climatizar ambientes de grande porte, tendo como função arrefecer um fluido para proporcionar o resfriamento de um espaço. Dentre os ciclos, os *chillers* com essa tecnologia configuram-se como uma forma promissora para fins de resfriamento (Alhuyi-Nazari *et al.*, 2023). O *chiller* por absorção pode ser implementado em hospitais, uma vez que seu fornecimento pode ser consideravelmente econômico devido ao baixo custo do fornecimento de calor (Arabkoohsar; Sadi, 2020).

Os sistemas de climatização são relevantes para fornecer resfriamento com custo reduzido e garantir conforto térmico para todo o complexo de saúde. Em uma Unidade de Terapia Intensiva (UTI), a demanda energética é considerada elevada, tendo em vista o seu funcionamento contínuo, atividades rotineiras específicas e concentração de equipes multiprofissionais. Assim, cidades com um potencial acentuado de radiação solar podem se beneficiar da utilização de sistemas de climatização de fonte renovável.

Em São Luís-MA, a incidência solar é elevada, uma vez que a cidade está localizada a 2° Norte da linha do Equador e possui baixa latitude, o que pode contribuir para a demanda pela implementação de um sistema sustentável de climatização por ar-condicionado em complexos hospitalares. Nesta pesquisa, dois sistemas de climatização foram propostos com o intuito de identificar a eficiência energética, a demanda de energia e o impacto ambiental.

Com base no que foi exposto anteriormente, esta pesquisa visa responder: qual a viabilidade de implementar um sistema de climatização sustentável (baseado em energia renovável) para a UTI do Hospital Universitário do Maranhão (HUUFMA), comparando-o energeticamente com um sistema convencional de compressão de vapor.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a viabilidade de implementação de um sistema de climatização sustentável, baseado em energia solar, para a UTI do HUUFMA, em comparação com um sistema convencional de compressão de vapor mediante a simulação energética de cada proposta.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as características construtivas, as condições termohigrométricas e o posicionamento solar da UTI estudada;
- Estimar a carga térmica total dos ambientes da UTI, a partir do levantamento das variáveis de geração de calor;
- Propor dois sistemas de climatização de ar-condicionado: um *chiller* por absorção e um *chiller* por compressão de vapor para a UTI;
- Comparar a viabilidade de acionamento de dois sistemas de climatização de ar-condicionado com base nas condições energéticas e operacionais;
- Investigar as condições para a implementação eficaz de um sistema de climatização de ar-condicionado, levando em conta as particularidades locais de São Luís-MA.

### 3 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa investigou a viabilidade técnica e econômica de um sistema de climatização sustentável para a UTI do HUUFMA, em São Luís-MA. Este estudo analisou duas propostas de climatização, como um sistema de *chiller* por absorção acionado por energia térmica e um sistema de compressão de vapor acionado pela rede pública de energia elétrica.

No que diz respeito à relevância acadêmica, esta pesquisa busca preencher uma lacuna na literatura acerca do uso de energias renováveis para sistemas de climatização em ambientes hospitalares, tendo em vista o crescente consumo energético que essas instituições demandam. Assim sendo, estudos que contemplaram a utilização de um sistema de climatização de fonte renovável se direcionou para diferentes enfoques, como os de Lin *et al.* (2024) que abordaram sistemas de ar-condicionado de aeroportos, Abreu *et al.* (2022), que trataram sobre uma análise termoeconômica e termoambiental de um sistema de climatização em um shopping center, Narayanan, Harilal e Golder (2021) que investigaram a viabilidade de um sistema de resfriamento por absorção solar para um complexo residencial na Austrália.

Nesta pesquisa, optou-se por estudar uma UTI, uma vez que esses espaços apresentam funcionamento contínuo, demandam conforto térmico para os pacientes e equipe assistencial, assim como a redução de custos operacionais para o hospital. Esses ambientes devem buscar por eficiência energética e um enfoque sustentável, de modo a alcançarem a qualidade necessária para o seu funcionamento.

Assim, considera-se que estudos sobre sistemas de climatização para ambientes hospitalares são escassos na literatura e devem ser abordados para que se possa compreender a viabilidade dessa tecnologia empregada, o seu impacto ambiental, a diminuição de custos operacionais e as suas limitações. Desse modo, esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento no campo da climatização acionada por energias renováveis.

Para tanto, propor um sistema de climatização sustentável contribui com a literatura da área, uma vez que visa ampliar o conhecimento acadêmico sobre o desenvolvimento de novos sistemas de climatização mais eficientes, adaptados e sustentáveis para uma UTI. Logo, esse conhecimento técnico pode expandir soluções sustentáveis em ambientes críticos atrelados à eficiência energética.

Pesquisas que abordam as tecnologias de resfriamento e aquecimento por absorção têm se destacado como uma alternativa viável, quando comparadas aos sistemas de compressão de vapor. A título de exemplo, Amaris, Vallès e Bourouis (2018) consideraram que esses sistemas utilizam fluidos de trabalho com um menor impacto ambiental e são acionados termicamente, apresentando um alto potencial de economia de energia. Goyal *et al.* (2016) demonstraram que os sistemas de absorção térmica se mostram eficientes em áreas onde a energia é escassa ou possui um consumo energético mais elevado. Enquanto para Al-Ugla, Shaarawi e Said (2015), o sistema de absorção solar é mais economicamente viável e reduz a demanda elétrica durante os períodos de pico.

Quanto à relevância prática, verifica-se que a implantação de sistemas de climatização sustentáveis pode resultar em uma significativa redução dos custos operacionais para os hospitais. A pesquisa também visa fornecer dados sobre a viabilidade de sistemas de absorção e compressão, o que permite que os gestores tomem decisões informadas sobre os investimentos que contribuam para a sustentabilidade financeira das instituições de saúde.

O sistema AVAC é o principal responsável por até 60% do custo total de energia em hospitais, conforme demonstram os estudos de Daud *et al.* (2023), que consideram essa demanda energética uma justificativa para os estudos das alternativas sustentáveis em ambientes hospitalares. Logo, diante da crescente demanda por gestão energética eficiente em hospitais, faz-se necessário analisar as contribuições que esse sistema pode desencadear na prática, como a mitigação dos impactos ambientais e redução dos custos operacionais para uma melhor alocação eficiente de recursos.

Acerca da relevância social, considera-se que em um contexto de crescente conscientização ambiental, os hospitais têm a responsabilidade de minimizar o seu impacto ecológico. A adoção de tecnologias de refrigeração solar não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis, mas também promove a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Dessa maneira, este estudo visa promover a sustentabilidade integradas à tecnologia de baixo consumo energético, dentre outras contribuições.

Ao investigar tecnologias inovadoras de climatização, esta pesquisa se alinha às diretrizes ambientais, sociais e econômicas para o Desenvolvimento Sustentável. Além disso, o estudo comparativo entre os dois sistemas de climatização proporciona

uma melhor compreensão da utilização das tecnologias para o aproveitamento de recursos renováveis.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 SISTEMAS DE ARREFECIMENTOS

A Energia utilizada como forma de iluminação, aquecimento e arrefecimento constitui as principais fontes de gasto energético em uma edificação comercial, uma vez que os edifícios comerciais são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo global anual de energia (Zhao *et al.*, 2017). Em face do contexto energético contemporâneo, estima-se que até 2040 poderá ocorrer uma crise energética, caso o consumo e a produção de energia acelerem com base no ritmo atual (Jadhav; Raut; Kalamkar, 2023).

Atrelado a essa perspectiva, de acordo com o relatório divulgado pela Agência Internacional de Energia (IEA), o arrefecimento dos edifícios, que corresponde a um processo de redução da temperatura do ambiente, contribui para cerca de 20% do consumo global de eletricidade. Assim, prevê-se que, até 2050, a quantidade de eletricidade utilizada para fins de resfriamento mais que triplicará, tendo em vista a expansão das áreas urbanas, um maior acesso à eletricidade, rendimentos mais elevados da população e o declínio dos preços dos aparelhos de ar condicionado em diversos países em desenvolvimento, sendo evidenciado que o mercado global de aparelhos de ar condicionado encontra-se atualmente em acentuada expansão, o que propicia um aumento no consumo de energia (IEA, 2018).

No Brasil, a energia elétrica representa a segunda maior fonte de energia consumida no país, ficando apenas atrás do petróleo, demonstrando a importância crucial da eletricidade como um pilar fundamental da matriz energética nacional. Em 2022, segundo os dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), o setor de edificações teve uma participação significativa no consumo energético total do Brasil, correspondendo a 16% do consumo energético total do país. Além disso, projeções indicam um expressivo crescimento dessa participação, que atingirá cerca de 51% até 2031 (EPE, 2023). Esse aumento reflete a crescente demanda por energia elétrica nas áreas residenciais, comerciais e de serviços, o que destaca a importância de políticas de eficiência energética e de investimentos pautados em fontes de energia renováveis para atender a essa demanda de vertente sustentável (EPE, 2023).

Os dados do Sexto Relatório de Avaliação de Mudanças Climáticas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destacam cenários previstos

de aumento médio de temperatura global entre 1 e 5 °C até o ano de 2100 (IPCC, 2023). Essas projeções ressaltam a urgência da implementação de ações que visam mitigar as mudanças climáticas e impulsionar a transição para fontes de energia mais sustentáveis (Kim; Ferreira, 2008).

Diante do aumento da temperatura global, a temática do conforto térmico e da qualidade do ambiente torna-se cada vez mais crucial. Em um cenário de mudanças climáticas, garantir condições confortáveis em ambientes internos e externos torna-se fundamental, não apenas para o bem-estar dos seres humanos, mas também para a produtividade, a saúde e a sustentabilidade dos espaços construídos (Santamouris *et al.*, 2017).

Frente a essa situação, temperaturas elevadas podem resultar em sintomas agudos de saúde, como dor de cabeça e dificuldade de concentração, além de impactar negativamente o desempenho cognitivo dos seres humanos. Estudos realizados na Suécia revelaram que o desempenho escolar de crianças entre 9 e 12 anos é considerado significativamente menor entre 27 e 30°C, em comparação com a temperatura a 20°C. Logo, a magnitude do efeito adverso da temperatura-pode reduzir em até 30% o desempenho das crianças em certas tarefas (Wu; Wagner, 2024).

Ao constatar um aumento da intensidade e frequência das ondas de calor, bem como do aumento das temperaturas médias em regiões tropicais, há uma demanda crescente pelo resfriamento de ambientes via o uso de ar-condicionado para mitigar os efeitos negativos das ondas de calor, tanto para a saúde quanto para o conforto. Dessa forma, a crescente demanda por refrigeração necessária para o futuro resultará em um maior consumo de energia, ocasionando o aumento das emissões de gases de efeito estufa (Sulaiman *et al.*, 2023).

O equilíbrio termofisiológico do corpo humano e o conforto térmico estão intimamente relacionados, por isso, a temperatura, a umidade e a velocidade do ar correspondem a um dos principais parâmetros que definem a qualidade de um ambiente (Gonçalves; Bode, 2015).

O conforto térmico é uma condição a ser alcançada e é inerente à satisfação do ser humano com as condições térmicas do meio ambiente e pode variar de acordo com cada indivíduo. Dependendo de fatores quantificáveis, como a umidade, a temperatura, a velocidade do ar e psicossociais, como o estado mental, os hábitos, a educação e a cultura (ASHRAE, 2024).

Na esfera atual, diversas atividades da vida humana dependem do uso de equipamentos que operam com base nos princípios da refrigeração. Em certos casos, pode-se até mencionar que a própria sobrevivência humana em climas adversos depende de um processo de refrigeração. Nesse contexto, o desenvolvimento na área de refrigeração permitiu à humanidade criar condições de conforto térmico necessárias para a realização produtiva de suas atividades e para a sobrevivência em climas adversos (Carlesso; Dutra; Rosa, 2020).

Os sistemas de refrigeração desempenham um papel fundamental em diversos âmbitos e setores, como os ambientes hospitalares, que são espaços que devem manter as condições climáticas necessárias por meio do controle da temperatura e umidade, mantendo um ambiente limpo e livre de germes, que podem contribuir para o bem-estar dos pacientes e prevenir a propagação de doenças. Além disso, certos tratamentos devem ser aplicados sob condições térmicas específicas. Assim, os suprimentos, medicamentos, drogas, atividades laboratoriais, bancos de sangue e tecidos requerem refrigeração e devem ser mantidos com base em padrões exigidos por parte da instituição e práticas ecologicamente corretas (Martínez; Poveda, 2022).

Ante ao exposto, o conceito de refrigeração corresponde a um processo de remoção do calor de um determinado meio e a manutenção dessa condição, por meio de métodos naturais ou mecânicos. Para tanto, existem diversas aplicações da refrigeração, dentre elas, destacam-se a conservação de alimentos e o conforto térmico (Silva, 2004).

Para isso, podemos considerar os métodos principais de refrigeração para o conforto térmico: o natural e o mecânico. O método natural se caracteriza pela ausência de processos artificiais ou dispositivos mecânicos para alcançar a refrigeração, enquanto o método mecânico se baseia na utilização de um refrigerante como fluido de trabalho. Esse refrigerante é relevante no ciclo de refrigeração, caracterizado pelos processos de evaporação, compressão, condensação e expansão, pois evapora em baixas temperaturas, absorvendo calor e transportando-o para rejeição no estado gasoso (Wang *et al.*, 2016).

A produção do frio para o resfriamento de ar no interior da edificação depende de fenômenos físicos ou químicos de natureza endotérmica, dentre os mais utilizados, encontram-se a refrigeração mecânica por meio de compressão de vapor, refrigeração por absorção e adsorção (Costa, 2013).

A compressão de vapor é a primeira tecnologia de refrigeração, que contempla quatro etapas: evaporação, compressão, condensação e expansão. O refrigerante, ao evaporar, absorve calor do ambiente, gerando o efeito de resfriamento. O vapor é então comprimido, aumentando sua pressão e temperatura, antes de ser condensado, liberando calor. A expansão reduz a pressão e temperatura, permitindo que o refrigerante retorne ao estado líquido e reinicie o ciclo (Moran *et al.*, 2014).

A segunda tecnologia de refrigeração por absorção consiste em um gerador, uma bomba e um absorvedor que, juntos, são capazes de comprimir o vapor refrigerante, no qual o evaporador aspira o vapor refrigerante por absorção no absorvedor, a energia térmica extra separa o vapor refrigerante da solução rica e o condensador condensa o refrigerante, rejeitando o calor, e então, o refrigerante líquido resfriado é expandido pelo evaporador e o ciclo é concluído (Sarbu; Sebarchievici, 2013).

A tecnologia de refrigeração por adsorção opera de forma semelhante ao ciclo de absorção, mas com o refrigerante e um sólido adsorvente como o par essencial (Vazzoler; Aguiar, 2021). Esse método aproveita a capacidade de certos materiais sólidos de adsorver quantidades significativas de refrigerante sob condições específicas de temperatura e pressão, para então liberá-los posteriormente (Goyal *et al.*, 2016).

Diante disso, o sistema convencional de compressão de vapor é uma tecnologia moderna e versátil, sendo amplamente utilizado para alcançar uma qualidade do ar interior confortável (Sharma; Sharma; Ali, 2020). No entanto, essa metodologia contribui com a maior parte da energia total consumida pelas aplicações de refrigeração/resfriamento, como também ocasiona a poluição devido a utilização de refrigerantes com um alto potencial de aquecimento global (Jadhav; Raut; Kalamkar, 2023).

O Quadro 1 apresenta um resumo dos diferentes tipos de refrigeração expostos, juntamente com suas aplicações e características distintas. Essa apresentação tem como objetivo destacar sucintamente as diversas tecnologias de refrigeração disponíveis e as suas respectivas utilidades.

Quadro 1 - Tecnologias de refrigeração

| <b>Tipos de refrigeração</b>         | <b>Características</b>   | <b>Aplicação</b>   |
|--------------------------------------|--|--|
| Refrigeração natural                 | Processo sem uso de dispositivos mecânicos, caracterizado por utilizar a ventilação para promover a troca de ar e dissipação natural do calor. | Sistemas de ventilação cruzada                                       |
| Refrigeração por compressão de vapor | Utilização de fluido refrigerante para transferir calor por meio de compressão do vapor.   | Equipamentos de ar-condicionado convencional                         |
| Refrigeração por adsorção            | Processo baseado na interação entre substâncias adsorventes e adsorvidas para remoção de calor   | Sistemas especiais que empregam sorventes como zeólitos e Sílica gel |
| Refrigeração por absorção            | Sistema que envolve a absorção de um refrigerante por um absorvente. Necessita de aporte de energia térmica para funcionamento                 | Aplicações industriais e comerciais de grande porte em refrigeração  |

Fonte: Adaptado de Kim e Ferreira (2008).

Os sistemas convencionais por compressão de vapor não são viáveis para serem utilizados em locais onde há escassez de energia elétrica devido à alta demanda. Diante disso, o ciclo de absorção torna-se uma alternativa cada vez mais popular à medida que pode ser alimentado por diversas fontes, como o calor renovável e o calor residual, ambos disponíveis na indústria, por exemplo (Sharma; Sharma; Ali, 2020).

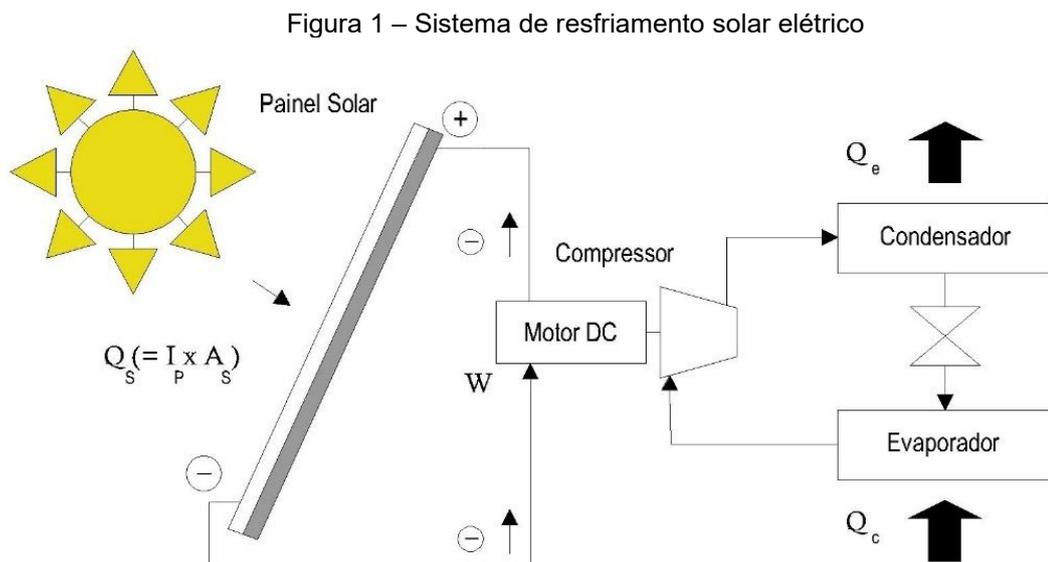
Com isso, desenvolver tecnologias de refrigeração ecologicamente corretas e energeticamente eficientes tornou-se cada vez mais relevante para atender à crescente demanda por energia em caráter mundial. Diante desse cenário, verifica-se que a tecnologia alternativa de resfriamento tem melhor desempenho, o que reduz a necessidade de eletricidade para ar-condicionado e refrigeração. Essa tecnologia pode ser alimentada por fontes, como a energia solar, gás natural, calor residual ou energia geotérmica, podendo substituir os sistemas convencionais de compressão de vapor (Rodríguez-Toscano *et al.*, 2022).

Sistemas sustentáveis ecológicos desenvolvidos para serem utilizados em AVAC, como o ar-condicionado solar, bomba de calor geotérmica e sistemas de resfriamento baseados em absorção e adsorção, têm o potencial de superar as limitações dos sistemas de refrigeração convencionais. No entanto, há uma tendência a favor da tecnologia de absorção em detrimento da adsorção, devido à sua alta capacidade de resfriamento por unidade de massa e volume, bem como a seu baixo custo (Sharma; Sharma; Ali, 2020).

A energia solar se destaca entre os recursos renováveis aplicados ao resfriamento, devido à sua significativa capacidade de aplicação, considerando que a energia solar é inesgotável (Zhu *et al.*, 2022). Estudos indicam que as necessidades globais de energia podem ser supridas com apenas 5% da irradiação solar incidente na Terra e ao combinar a geração de energia solar com a refrigeração, é possível não apenas mitigar a ameaça da crise energética, mas também oferecer uma solução mais ecológica para o setor de refrigeração (Jadhav; Raut; Kalamkar, 2023).

As tecnologias de resfriamento solar são comumente categorizadas com base na fonte de energia que as alimenta, subdividindo-se em processos solares elétricos ou solares térmicos. Os processos solares elétricos se baseiam na conversão da luz solar em eletricidade por meio de painéis fotovoltaico, enquanto os processos solares térmicos utilizam o calor armazenado em coletores solares para gerar energia para os sistemas de refrigeração por absorção ou adsorção (Prieto *et al.*, 2019; (Jadhav; Raut; Kalamkar, 2023).

A Figura 1 apresenta um modelo que demonstra como um ciclo de compressão de vapor é acionado por um painel fotovoltaico. Esse painel fotovoltaico é responsável pela geração da energia elétrica necessária para alimentar o motor elétrico conectado ao compressor.

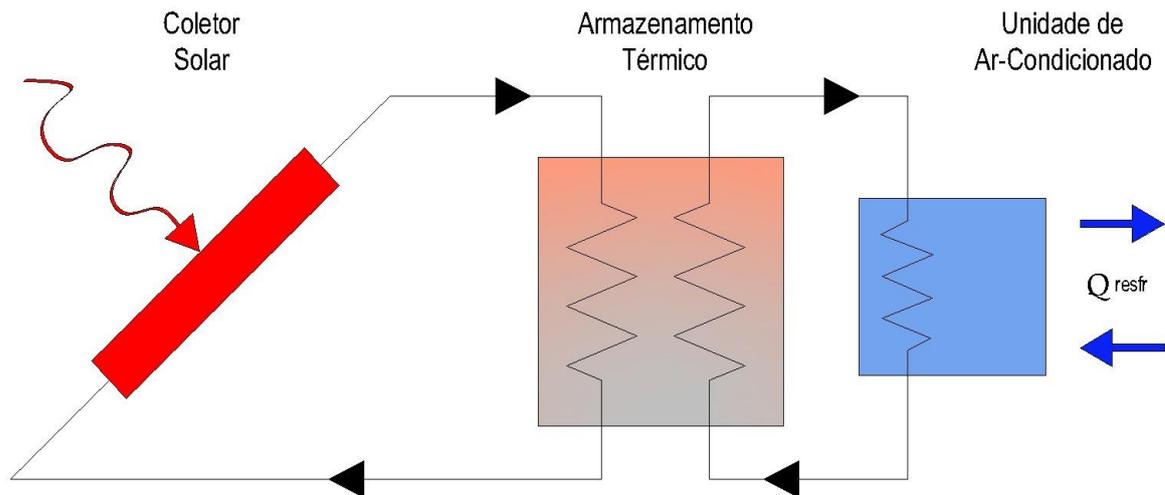


Fonte: Adaptado de Kim e Ferreira (2008).

A Figura 2 apresenta o fornecimento de calor ao processo de refrigeração por absorção, no qual o calor absorvido pelo fluido nos coletores solares fornece energia

para a expansão do líquido absorvente. Nesse processo, a energia térmica proveniente dos coletores solares é transferida para o sistema de refrigeração por absorção, desempenhando um papel fundamental na geração do ciclo de resfriamento.

Figura 2 – Sistema de resfriamento térmico solar



Fonte: Adaptado de Otanicar; Taylor; Phelan (2012).

Ante o exposto, os ciclos operados com energia fotovoltaica apresentam como principal desvantagem o custo mais elevado e uma menor eficiência na conversão de energia, em comparação com a refrigeração térmica, convertendo menos de um terço da radiação solar em eletricidade (Sharma; Sharma; Ali, 2020).

Devido a essa questão, a abordagem fotovoltaica é tipicamente mais utilizada em sistemas de compressão convencionais movidos a vapor, ao contrário da abordagem térmica, na qual o sistema é acionado termicamente e resfriado pela absorção do vapor refrigerante em um líquido, em razão da disponibilidade de ciclos tradicionais no mercado. Esse método permite um aumento da pressão de forma econômica por meio de uma bomba, ao contrário de um compressor de vapor, que exige maior esforço mecânico (Otanicar; Taylor; Phelan, 2012).

Além disso, a eficiência dos coletores solares utilizados na abordagem térmica se destaca em relação aos sistemas de refrigeração fotovoltaicos, tornando os sistemas solares térmicos mais vantajosos, tanto ambientalmente quanto economicamente, em relação aos sistemas de refrigeração baseados em absorção

de energia. A comparação entre um sistema de refrigeração por compressão de vapor alimentado por um conjunto fotovoltaico e um sistema de refrigeração por absorção movido por uma unidade térmica demonstra a viabilidade econômica de ambos os sistemas (Rodríguez-Toscano *et al.*, 2022).

Do ponto de vista energético, a energia solar térmica é vista como uma solução atrativa para a produção de energia térmica em processos industriais, representando uma oportunidade para substituir fontes de energia convencionais (Kumar; Chaitanya; Kumar, 2021). Além disso, os sistemas de refrigeração por absorção são considerados tecnologias energéticas, sustentáveis e mais vantajosos do que os sistemas de compressão de vapor quando alimentados por diferentes fontes de energia térmica disponíveis (Rodríguez-Toscano *et al.*, 2022).

Nos últimos anos, estudos destacaram que os sistemas de absorção movidos a energia solar têm sido amplamente pesquisados, como em uma pesquisa realizada em um edifício escolar na Itália, onde foi avaliada a viabilidade energética e econômica de um sistema de aquecimento solar e resfriamento de água/absorção de LiBr. Logo, os resultados demonstraram que 20% da carga de refrigeração poderia ser coberta por energia solar, com um tempo de retorno do investimento dos sistemas propostos de 12 anos, considerando a tarifa pública de aquisição (Calise, 2010).

Neste contexto, o resfriamento solar e o ar-condicionado convencionais são cada vez mais necessários para combater o estresse térmico, o aumento das temperaturas resultantes das mudanças climáticas e para garantir a manutenção da saúde e bem-estar dos seres humanos, conforme os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como a ODS3. O uso de sistemas de refrigeração convencionais para resfriamento consome uma grande quantidade de energia, o que impacta o cumprimento da ODS7: energia limpa e acessível. No entanto, o arrefecimento solar, embora contribua para o alcance da ODS3, utiliza energia solar, que é uma fonte de energia acessível e limpa, em conformidade com o ODS7 (Hasan *et al.*, 2022).

## 4.2 ENERGIA SOLAR

Na Terra, a energia solar é gerada pela radiação eletromagnética emitida pelo Sol, devido às reações termonucleares em seu núcleo. A maior parte das fontes de energia presentes no planeta tem sua origem no Sol, seja de forma direta ou indireta, exceto a energia nuclear, das marés e geotérmica. Recentemente, tem ocorrido um

aumento significativo no interesse da comunidade científica por essa forma de energia, principalmente devido à crescente demanda por aquecimento, refrigeração de edifícios e outras aplicações (Sarbu; Sebarchievici, 2013).

Nesse contexto, a incidência do potencial energético solar apresenta diversas vantagens, uma vez que é uma fonte de energia 100% gratuita e está disponível para os países desenvolvidos e em desenvolvimento (Irena, 2021). A energia solar pode ser facilmente convertida em mais de 40 outras formas de energia e é considerada uma alternativa importante para apoiar o desenvolvimento de regiões menos desenvolvidas, bem como garantir a estabilidade e a independência energética (Irena, 2021). Além disso, o uso da energia solar reduz as emissões de CO<sub>2</sub> e ajuda a proteger o meio ambiente, o que torna esse aspecto relevante para o desenvolvimento econômico sustentável (Martins, 2021).

Diante dessa premissa, o Sol se destaca como a principal fonte de energia renovável, emitindo radiação com intensidade constante além da atmosfera terrestre. Somente a radiação direta (feixe) está acessível fora da atmosfera terrestre. À medida que a radiação solar atravessa a atmosfera, ela sofre atenuação, gerando componentes diretos e difusos que chegam à superfície terrestre (Madhlopa, 2022).

A Irradiação Global Horizontal (GHI) quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal, composta pela irradiação difusa horizontal, que é dispersa e atenuada por nuvens, poeira e vapor d'água, assim como pela irradiação normal direta, que incide diretamente sobre o solo, sem reflexões (EPE, 2016).

Referindo-se à energia solar, ela é mencionada como uma das opções mais acessíveis, cujo uso não implica na destruição do meio ambiente, tendo o seu desenvolvimento gradativo ao longo do tempo em consonância com os avanços tecnológicos em diversos países do planeta. Dessa forma, através de diversos instrumentos desenvolvidos a partir dos conhecimentos na área da engenharia mecânica, elétrica, eletrônica ou outra, a energia solar pode ser utilizada sob a forma de energia solar térmica para a geração de calor ou de energia fotovoltaica para a obtenção de eletricidade (Vega *et al.*, 2024).

É vital que as análises das intensidades e variações da radiação solar abarquem um período mínimo de um ano. Essas investigações demonstram que as séries temporais e espaciais dos componentes da radiação incidente na superfície fornecem uma compreensão da disponibilidade energética diária, mensal e anual. No

entanto, tais pesquisas exigem medidas simultâneas regulares em diversas condições astronômicas, geográficas e climáticas (Souza *et al.*, 2011).

Nos processos que envolvem a conversão de energia solar em eletricidade, ambas as formas de irradiação são de extrema importância. No entanto, em processos térmicos que utilizam energia solar para a transformação em calor, como é o caso da refrigeração térmica solar, destaca-se que a irradiação direta que chega à superfície da terra desempenha um papel significativo (EPE, 2016).

A posição geográfica privilegiada do Brasil, o destaca como um dos locais mais promissores para a exploração da energia solar. Essa vantagem fica particularmente evidente ao ser analisado a média de incidência de radiação solar no país, o que demonstra, conforme os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, uma notável variação de potencial solar, com média de irradiação horizontal solar global de 5,13 kWh/dia por metro quadrado (INPE, 2017).

Em relação ao estado do Maranhão, é interessante observar que, no mapa brasileiro de radiação solar, a cidade de São Luís apresenta uma incidência média de radiação solar significativa, atingindo uma média de 5,37 kW/m<sup>2</sup> por dia, conforme ilustrado na Tabela 1. Esse nível de irradiação destaca não apenas a capacidade do Maranhão, mas também o potencial específico de São Luís como um dos locais estratégicos para o desenvolvimento de projetos de energia solar no Brasil.

Tabela 1 – Irradiação solar diária média [kWh/m<sup>2</sup>. dia]

| Latitude (°S) | Longitude (°O) | Distância (km) | Média |
|---------------|----------------|----------------|-------|
| 2.201         | 44.349         | 5.23           | 5.37  |
| 2.301         | 44.049         | 5.23           | 5.37  |
| 2.401         | 43.749         | 5.27           | 5.45  |

Fonte: Adaptado do Centro de Referência para Energia Solar (2024).

Nesse contexto, a energia solar térmica se beneficia principalmente da radiação solar direta. Locais apropriados para esse tipo de tecnologia devem garantir uma irradiação solar direta anual de no mínimo 2.000 kWh/m<sup>2</sup>, embora algumas regiões operem com valores moderadamente inferiores, enquanto outras, mais propícias, oferecem mais de 2.500 kWh/m<sup>2</sup>. Nos sistemas solares térmicos, a energia radiante do sol é empregada para aquecer a água ou outros fluidos, os quais são utilizados em diversas aplicações (Vega *et al.*, 2024).

Diante dessa compreensão, destaca-se a utilização das tecnologias de refrigeração solar térmica. Essa abordagem representa uma evolução contínua no uso

da energia solar, pois não se limita apenas ao aquecimento, mas também abrange o resfriamento. Isso evidencia a versatilidade e o potencial expansivo da energia solar, demonstrando sua capacidade de converter radiação direta em soluções energéticas para climatização.

#### 4.3 TECNOLOGIAS DE REFRIGERAÇÃO SOLAR

A energia solar é uma fonte versátil que pode ser aproveitada para produzir refrigeração utilizada no resfriamento de edifícios, sistemas de ar-condicionado e para a conservação de alimentos, por exemplo. O resfriamento solar se destaca por sua eficácia nos contextos de maior demanda, quando a intensidade da luz solar é mais significativa. Essa eficiência é particularmente relevante em regiões de clima quente, em que a necessidade de garantir o conforto térmico dos seres humanos é primordial. A interseção entre a demanda por resfriamento e a disponibilidade de energia solar tornam a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas de refrigeração solar uma área extremamente promissora e em constante evolução (Rodríguez-Toscano *et al.*, 2022).

Essa progressão no desenvolvimento de sistemas de resfriamento é atribuída à utilização da energia solar térmica na produção de refrigeração, conhecida como refrigeração solar (*solar cooling*), sendo uma tecnologia altamente promissora. Isso se deve ao fato de que as temperaturas necessárias não precisam ser excessivamente elevadas e podem ser alcançadas através de coletores planos convencionais de alto desempenho ou coletores concentradores de pequeno porte (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2023).

Esse baixo nível de temperatura contribui para a harmonia entre a energia solar e o processo de resfriamento térmico por um sistema de absorção, demonstrando ser altamente eficaz e sustentável, especialmente durante os períodos de pico de demanda. Enquanto os sistemas de adsorção apresentam desvantagens, como a baixa eficiência e uma área de cobertura limitada, em comparação com os de absorção, que esses equipamentos se destacam por sua viabilidade econômica em edifícios de grande porte (Prieto *et al.*, 2019).

Outro ponto que corrobora para a crescente popularidade do resfriamento térmico solar é a capacidade dos coletores solares de absorver mais de 95% da radiação solar incidente, tornando-os uma escolha atrativa para as aplicações de refrigeração solar (Otanicar; Taylor; Phelan, 2012). Em contrapartida, os sistemas

solares fotovoltaicos absorvem menos de um terço da radiação solar incidente (Sharma; Sharma; Ali, 2020).

Mesmo quando é necessário algum deslocamento entre o acúmulo da energia térmica e a necessidade de resfriamento solar térmico, é possível armazenar facilmente em tanques de acumulação, tanto na forma de calor para uso posterior no sistema de absorção, como na forma de frio, que pode ser usado diretamente no sistema de distribuição de ar-condicionado.

Para uma compreensão mais aprofundada dos princípios de funcionamento da refrigeração solar, é importante destacar a relevância da apresentação dos tipos de coletores solares necessários, bem como a explicação detalhada sobre o funcionamento dos ciclos de refrigeração, em especial, por absorção.

#### **4.3.1 Coletor Solar**

A partir de 2004, os avanços econômicos e tecnológicos, juntamente com o aumento do mercado de tecnologias solares térmicas, resultaram em um crescimento significativo na pesquisa sobre tecnologias de resfriamento solar térmico, destacando o resfriamento por absorção solar como a opção mais promissora entre essas tecnologias (Alsagri; Alrobaian; Almohaimeed, 2020).

Diante dos avanços tecnológicos e econômicos, os sistemas de refrigeração por absorção emergiram como alternativas promissoras, recebendo significativo interesse da comunidade acadêmica. Essa atenção crescente se deve à ampla diversidade de combinações potenciais de fluidos refrigerantes e absorventes disponíveis, as quais oferecem diversas opções para otimizar a eficiência e o desempenho desses ciclos (Hasan *et al.*, 2022).

O resfriamento térmico solar é mais acessível que o resfriamento elétrico baseado em energia solar fotovoltaica e possui uma taxa de conversão mais elevada para a forma utilizável. Esse tipo de resfriamento é obtido por meio de um sistema de refrigeração por absorção de vapor, uma vez que é um sistema acionado por baixa energia e pode ser operado com uma fonte de calor a uma temperatura média (80–100 °C).

No processo de refrigeração, os coletores solares térmicos, conhecidos como captadores, desempenham um papel crucial na conversão da energia solar térmica em calor. Esses dispositivos funcionam com base em princípios como a absorção de

radiação solar e a transferência de calor, diversificando-se conforme o tipo de coletor utilizado, como coletores planos, tubos a vácuo e coletores de concentração (Vega *et al.*, 2024).

Dessa forma, um coletor solar é um dispositivo que absorve a irradiação solar, captando a energia térmica. Essa energia armazenada é, então, transportada por um fluido que circula pelo sistema, sendo utilizada para diferentes propósitos específicos (Suman; Khan; Pathak, 2015).

No contexto de um sistema de refrigeração movido a calor, a presença de um coletor solar desempenha um papel fundamental ao fornecer calor ao ciclo térmico. A eficiência do coletor solar está diretamente associada à sua temperatura de operação. Embora o coletor possa ter uma eficiência reduzida em temperaturas mais elevadas, observa-se que o ciclo térmico frequentemente atinge uma eficiência superior nessas condições (Kim; Ferreira, 2008).

Em geral, os coletores solares são divididos em coletores concentradores e coletores não concentradores. Os coletores concentradores normalmente possuem uma superfície refletora que redireciona a luz solar para um pequeno receptor, aumentando a intensidade da energia solar capturada. Esse tipo de coletor solar opera principalmente em temperaturas mais elevadas, em comparação com os coletores não concentradores (Alsagri; Alrobaian; Almohaimeed, 2020).

Os coletores não concentradores caracterizam-se por permanecerem estacionários, independentemente da posição do sol. Eles são instalados em uma inclinação específica e com ângulos de orientação que dependem da localização geográfica, a fim de maximizar o aproveitamento da radiação solar. Dentre os tipos mais comuns de coletor solar encontra-se o coletor de placa plana. Esse coletor é constituído por uma cobertura transparente, geralmente de vidro, uma placa absorvente para capturar o calor e uma placa traseira paralela que auxilia na redução das perdas de calor para o ambiente (Suman; Khan; Pathak, 2015).

A Figura 3 apresenta um coletor solar de placas planas, que consiste em uma película absorvente de cor escura. Essa película é coberta por um vidro protetor para maximizar a absorção de calor enquanto minimiza a perda de calor para o ambiente. Em contato direto com a película absorvente, encontram-se posicionados tubos que transportam um fluido. Esse fluido é aquecido ao passar pelos tubos e, em seguida, é transportado para outras partes do sistema para utilização.

Figura 3 – Coletor solar de placas planas.



Fonte: Eldominves (2024).

Esses tipos de coletores são particularmente úteis para aquecer água em aplicações de baixas temperaturas, como em piscinas, estufas e aquicultura, onde a eficiência térmica e a capacidade de aproveitar a energia solar são fundamentais para o funcionamento adequado dos sistemas. Além disso, podem ser aplicados no aquecimento de água em processos industriais, garantindo sustentabilidade e redução de custos operacionais (Vega *et al.* 2024).

Os coletores solares concentradores são dispositivos que capturam a radiação solar direta e a concentram em uma área menor. Eles utilizam superfícies reflexivas, como espelhos, ou superfícies refrativas, como lentes, para direcionar a luz solar. Um coletor solar concentrador é composto por três partes principais: o concentrador, o receptor e um sistema de rastreamento. O concentrador reflete e focaliza a radiação solar em direção ao receptor, que absorve essa energia e a converte em calor (Kumar; Chaitanya; Kumar, 2021).

Dentre os tipos de coletores solares concentradores, podem-se classificar os seguintes: Coletores de Calha Parabólica (PTC), Coletores Parabólicos Compostos (CPC), Coletores Parabólicos (PDC), Coletores Lineares de Fresnel (LFR) e receptores centrais (Suman; Khan; Pathak, 2015).

O coletor de calha parabólica (PTC) utiliza um refletor parabólico para direcionar a radiação solar para um tubo absorvedor central. Esse tubo é coberto por uma tampa transparente concêntrica e é equipado com rastreadores solares que ajustam a posição do coletor ao longo do dia (Alsagri; Alrobaian; Almohaimeed, 2020).

Além disso, os PTC possuem como atribuição concentrar a radiação solar captada de uma área extensa para uma superfície absorvedora mais compacta. Esse processo requer um sistema de rastreamento eficiente. Os espelhos parabólicos são geralmente organizados em fileiras paralelas ao longo de um largo eixo norte-sul, permitindo o acompanhamento contínuo do sol de leste a oeste durante o dia, assegurando que a radiação solar esteja consistentemente concentrada nos tubos receptores (Vega *et al.* 2024).

A Figura 4 apresenta a instalação de coletores solares cilíndricos parabólicos, nos quais a incidência solar é direcionada para a calha parabólica. O coletor cilíndrico parabólico, também conhecido como o PTC, é composto por uma lâmina em forma de parábola que reflete a radiação solar direta e a concentra no tubo receptor localizado ao longo da linha focal.

Figura 4 – Coletor solar cilíndrico parabólico



Fonte: Renewable Power News (2009).

Em relação aos coletores parabólicos compostos (PDC), destaca-se o contraste com os coletores de calha parabólica. Os PDC compartilham semelhanças

com os coletores parabólicos convencionais, exceto pelo fato de os raios convergirem em um plano focal, em vez da linha focal usualmente associada. Essa característica distinta resulta em uma configuração que os diferencia dos modelos mais tradicionais (Suman; Khan; Pathak, 2015).

Na Figura 5, observa-se um PDC, no qual os raios solares convergem em direção aos tubos localizados ao longo do plano de incidência. Essa representação visual destaca a forma como a radiação solar é direcionada e concentrada nesse tipo específico de coletor solar.

Figura 5 – Coletor solar cilíndrico parabólico composto.



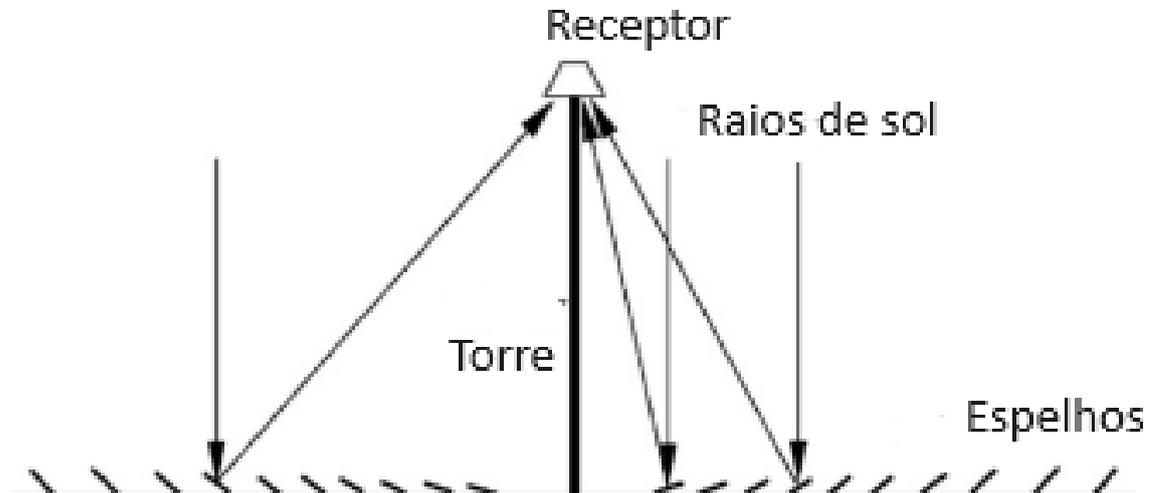
Fonte: Onosisolar (2024).

Nessa perspectiva, os refletores lineares de Fresnel são um tipo específico de coletor solar. Esses coletores usam grandes conjuntos de espelhos planos que direcionam e concentram a luz solar em um receptor linear. Esse receptor é normalmente colocado em uma torre alta, que pode variar entre 10 e 15 metros de altura, e é suspenso sobre matrizes de refletores alinhados (Barlev; Vidu; Stroev, 2011).

A Figura 6 apresenta um modelo de coletor linear de Fresnel, cujos planos de espelhos são projetados para refletir a incidência solar em direção a uma torre absorvedora específica. Esse design característico ilustra a forma pela qual a luz solar

é concentrada e redirecionada para a torre central, onde ocorre a absorção e a conversão da energia solar em calor.

Figura 6 – Coletor solar linear Fresnel.



Fonte: Adaptado de Barlev; Vidu; Stroev (2011).

Dentre os coletores concentradores, o coletor de calha parabólica apresenta a maior faixa de temperatura e, em geral, um custo menor. Isso se deve à utilização de tecnologias emergentes, que incluem novos materiais, melhorias nos processos de fabricação e *software* de modelagem. Essas inovações permitem otimizar o projeto, resultando em uma maior eficiência térmica dos receptores (Rajendran *et al.*, 2020).

O uso de coletores de calha parabólica tem se mostrado eficaz e sustentável para aplicações de resfriamento com *chillers* de absorção em sistemas de energia solar. A pesquisa econômica e energética corrobora que os coletores de calha parabólica apresentam um desempenho superior ao *chiller* por absorção em relação a qualquer outro tipo de coletor, fato que se deve à redução dos custos associados a esses coletores, o que os configura como a melhor tecnologia para esse sistema (Bellos *et al.*, 2017).

Na perspectiva da modelagem matemática para os coletores de calha parabólica, a eficiência térmica ( $\eta_{th}$ ), descrita na equação 1, é formulada como a relação entre a energia útil real obtida pelo fluido de transferência de calor, geralmente água ( $Q_u$ ), dada pela equação 2, e a radiação solar incidente no absorvedor. Essa energia útil representa a quantidade de energia capturada pelo fluido de transferência de calor do coletor solar, incluindo a energia disponível para a utilização. Essa abordagem, amplamente utilizada pela literatura como o estudo de Abu-Zeid (2024),

em que se destaca a importância da eficiência térmica na avaliação do desempenho e da eficácia dos coletores solares de calha parabólica.

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{G \times \Delta T \times A_{cs}} \quad (1)$$

$G$ : Radiação solar incidente por unidade de área. [W/m<sup>2</sup>]

$\Delta T$ : Variação de temperatura entre absorvedor do coletor e o ambiente circundante. [K]

$A_{cs}$ : Área do absorvedor diretamente envolvida na absorção da radiação solar. [m<sup>2</sup>]

$$Q_u = m_f \times c_p \times \Delta T \quad (2)$$

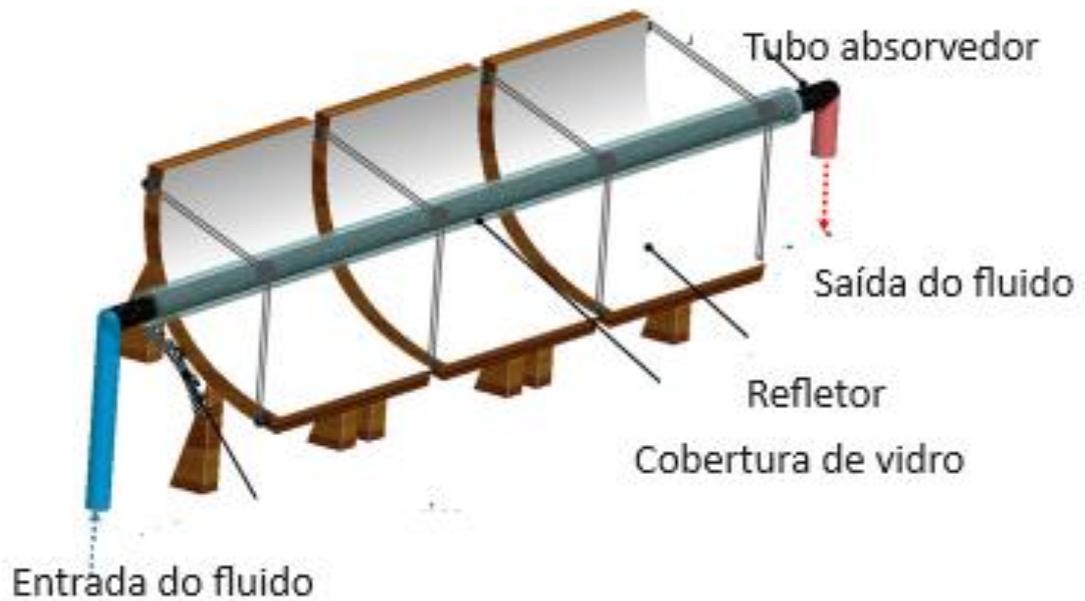
$m_f$ : Massa do fluido [kg]

$c_p$ : Capacidade calorífica específica da água [J/kg.K]

Em decorrência da energia útil captada pelo coletor de calha parabólica, surge a oportunidade de aproveitamento em um ciclo de refrigeração, onde o calor solar residual desempenha um papel relevante no acionamento de resfriadores por absorção. Nesses sistemas de refrigeração, o vapor do refrigerante é separado com auxílio de um condutor externo que fornece o calor necessário. Dessa forma, torna-se frequente e eficaz a utilização de coletores parabólicos em instalações de ar-condicionado, conforme destacado pelos estudos de Marugán-Cruz *et al.* (2015) ao investigarem o resfriamento distrital usando uma usina de torre central.

Na Figura 7, é possível observar a representação do processo de transferência de calor do coletor de placas de calha parabólica para o fluido de trabalho destinado ao ciclo de refrigeração por absorção. Nesse contexto integrado, a incidência da radiação solar nas placas do coletor parabólico resulta na concentração e absorção do calor solar devido à geometria especializada das placas. Então, esse calor é transferido para o fluido de trabalho, como água ou outro líquido refrigerante, que circula pelo coletor solar.

Figura 7 - Coletor cilíndrico parabólico



Fonte: Adaptado de Suman; Khan; Pathak (2015).

#### 4.3.2 Ciclo de Refrigeração

No contexto atual, os sistemas de refrigeração de destaque incluem os sistemas de compressão de vapor e de absorção. Dentre os ciclos de refrigeração, os principais são o ciclo padrão de compressão de vapor e o ciclo de absorção.

Os ciclos termodinâmicos de refrigeração são fundamentais na engenharia moderna, demandando estudos criteriosos devido à sua importância e ampla aplicação. O ciclo de compressão de vapor é prevalente em instalações industriais, comerciais e residenciais, sendo empregado na conservação de alimentos e no condicionamento de ar. Vale ressaltar que essas máquinas são tipicamente acionadas por energia elétrica.

Em contrapartida, os sistemas de absorção surgem como alternativas aos sistemas de compressão convencionais. Apesar dos custos iniciais e volumes maiores, esses sistemas se destacam pela eficiência energética e pela versatilidade no uso, que compensam com baixo consumo de eletricidade (até 5% da capacidade) e utilização de energias renováveis, como calor residual, radiação solar e biomassa (Abed *et al.*, 2017).

Do ponto de vista operacional, ambos os ciclos se assemelham, pois, possuem os mesmos dispositivos de acionamento. No entanto, a principal diferença entre eles reside na forma de acionamento: enquanto os ciclos de compressão dependem do

trabalho realizado pela tensão elétrica, os ciclos de absorção são acionados por uma fonte de calor externa (Sharma; Sharma; Ali, 2020).

Além disso, é relevante considerar que os sistemas de absorção requerem uma fonte de calor para funcionar. Em geral, a energia na forma de calor é mais econômica do que a energia necessária no ciclo de compressão (Jadhav; Raut; Kalamkar, 2023).

Assim, é necessário realizar uma análise minuciosa dos princípios de funcionamento desses ciclos, com o intuito de investigar os componentes do sistema e compreender detalhadamente o coeficiente de desempenho associado a esses ciclos. Esse estudo aprofundado é fundamental para a compreensão da eficiência e da operação dos ciclos de refrigeração, contribuindo para o avanço do conhecimento nessa área e para o desenvolvimento de soluções cada vez mais eficazes e sustentáveis na engenharia térmica.

#### **4.3.2.1 Ciclo por absorção**

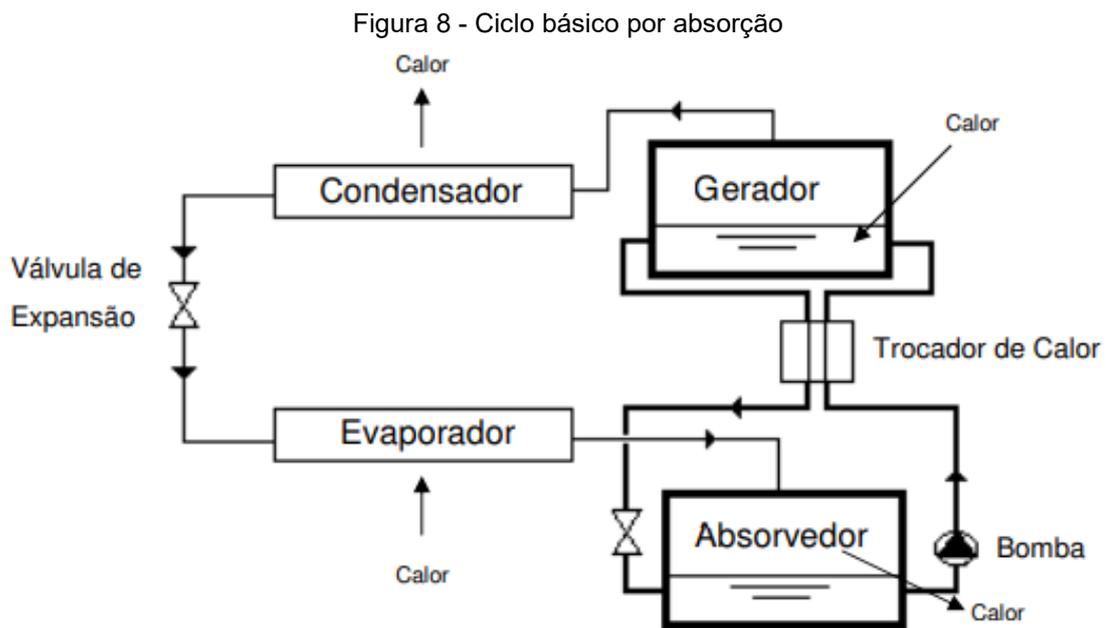
Os sistemas de refrigeração por absorção são projetados para utilizar energia térmica com o intuito de gerar refrigeração ou aquecimento. Esses sistemas consistem em dois fluidos: um absorvente, que está na fase líquida, e um fluido refrigerante, que se apresenta na forma de vapor. O absorvente é responsável por absorver o vapor do fluido refrigerante. Essa interação ocorre devido à afinidade química entre certos fluidos refrigerantes e absorventes, resultando na formação de uma mistura homogênea com diferentes temperaturas de vaporização para cada substância (Soares *et al.*, 2016).

Nesse contexto, o fenômeno da absorção ocorre quando um gás é misturado a um líquido que apresenta uma forte interação química ou física com ele, resultando na formação de uma solução (Fan; Luo; Souyri, 2007). Os ciclos de absorção, por sua vez, englobam um processo de 'sorção' baseado nessa interação, que pode ser física ou química, entre um par de substâncias, produzindo o efeito de refrigeração. Dessa forma, os sistemas de sorção demonstram a capacidade única de transformar energia térmica diretamente em energia de resfriamento (Bellos *et al.*, 2017).

Os principais fluidos refrigerantes utilizados são água/brometo de lítio ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ ) e amônia/água ( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ). Sistemas  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  são eficientes em resfriamento e ar-condicionado, enquanto  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  é mais adequado para ambientes industriais, devido à sua capacidade de suportar cargas de trabalho mais pesadas (Al-

Yasiri; Szabó; Arici, 2022). O ciclo de refrigeração por absorção requer componentes como evaporador, absorvedor, bomba de solução, condensador e válvula de expansão. Esse ciclo opera em dois níveis de pressão: baixa, no evaporador e absorvedor, e alta, no condensador e gerador (Shirazi *et al.*, 2018).

A Figura 8 apresenta um esquema do funcionamento de um ciclo de absorção simples, que constitui os componentes e os fluxos envolvidos nesse processo.



Fonte: Adaptado de Stoecker e Jones (1985).

Dessa maneira, cada componente do ciclo tem um papel específico. A bomba mecânica eleva a pressão para manter constante a temperatura de absorção. A válvula redutora de pressão direciona a solução empobrecida do gerador para o absorvedor. A válvula de expansão transfere o fluido refrigerante do condensador (alta pressão) para o evaporador (baixa pressão). O retorno da solução empobrecida e a entrada de vapor de refrigerante no absorvedor sustentam o processo de absorção, gerando frio no evaporador (Fan; Luo; Souyri, 2007).

Nessa linha de funcionamento, a solução rica é direcionada para a zona de alta pressão, onde é aquecida no gerador de vapor, contribuindo para a separação do refrigerante, como a água, e do absorvente, como o LiBr. Nesse processo, vapores são gerados e encaminhados para o ciclo convencional de condensação, expansão através da válvula de expansão e evaporação no evaporador.

Para alimentar esse sistema de refrigeração por absorção, é crucial fornecer calor, que pode ser obtido por meio de diversas fontes. Estas incluem calor residual industrial, água aquecida por energia solar ou calor geotérmico. Essas fontes de baixa temperatura oferecem benefícios significativos em termos de economia de energia e são consideradas alternativas viáveis para atender às demandas de calor necessárias para o funcionamento eficaz dos sistemas de refrigeração por absorção (Bao *et al.*, 2024).

Diversos estudos analisam a viabilidade econômica do uso de fontes de calor de baixa temperatura, como a água aquecida por energia solar. Rahman, Said e Issa (2020) investigaram um sistema de ar-condicionado de absorção alimentado por energia solar nos Emirados Árabes Unidos, com gerador acionado por coletor solar e bomba e ventiladores movidos por energia fotovoltaica. A análise considerou que o sistema era economicamente viável e com baixo impacto ambiental.

O estudo de Rodríguez-Toscano (2022) analisa diferentes fatores, como a temperatura de entrada no equipamento de absorção por vapor, a incidência solar e o número de efeitos do ciclo influenciam a viabilidade da instalação de sistemas de ar-condicionado. Esse trabalho identifica as condições operacionais que podem maximizar a eficiência dos sistemas de refrigeração por absorção, contribuindo para a implementação de soluções de climatização sustentáveis.

Dessa forma, é fundamental compreender que esses ciclos de absorção podem ser combinados para operar em configurações de simples efeito, duplo efeito e triplo efeito. No ciclo de simples efeito, conforme ilustrado pela Figura 8, a operação ocorre de forma direta. Nessa conjuntura, de acordo com Stoecker e Jones (1985), por outro lado, no ciclo de duplo efeito, uma característica distintiva corresponde a presença de um segundo gerador no ciclo, que utiliza o calor da água condensada no primeiro gerador para fornecer calor adicional.

Nesse sentido, a relação entre os ciclos com mais de um efeito demonstra Coeficientes de Performance mais elevados, variando de 0,6 a 0,7 para o simples efeito, 1,1 a 1,3 para o duplo e 1,6 a 1,7 para o triplo. No entanto, esses ciclos exigem uma quantidade significativamente maior de calor na entrada, acima de 130 °C, ao contrário do ciclo simples, que requer apenas 75 a 100 °C (Prieto *et al.*, 2019).

Por consequência, a maior parte dos sistemas de absorção adota o efeito único, integrando coletores solares de placa plana com operação em temperaturas mais baixas. Por outro lado, os sistemas de absorção de efeito múltiplo demandam

temperaturas mais elevadas para o fornecimento de calor, o que pode ser viabilizado por coletores de tubos de concentração ou de vácuo, embora essas opções obtenham custos mais elevados (Fan; Luo; Souyri, 2007).

Nos últimos anos, os ciclos de absorção por vapor de único efeito têm sido explorados, especialmente em integração com a energia solar térmica, oferecendo soluções sustentáveis para refrigeração e ar-condicionado (Sarbu; Sebarchievici, 2013). Sistemas de ar-condicionado solares utilizam coletores solares, absorvedores, bombas mecânicas e aquecedores auxiliares para manter a operação, compensando a variação na intensidade solar ao longo do dia (Sharma; Sharma; Ali, 2020).

A Figura 9 apresenta um modelo exemplificativo de uma instalação de ar-condicionado por absorção a vapor, acionada por coletores solares.

Figura 9 - Sistema de refrigeração solar.



Fonte: Coolx Energy (2017).

A instalação representada na Figura 9 descreve a implementação de coletores solares na cobertura de um edifício comercial, com o objetivo de fornecer o calor necessário para a operação de um sistema de climatização. Esse sistema é aplicado em uma planta situada na Alemanha. Al-Yasiri, Szabó e Arici (2022) abordam o uso de tecnologias sustentáveis e renováveis para atender às demandas térmicas de edificações comerciais, promovendo eficiência energética e redução de emissões de carbono. A implementação na Alemanha destaca a viabilidade dessas tecnologias em climas temperados, onde a radiação solar é eficaz para gerar energia térmica.

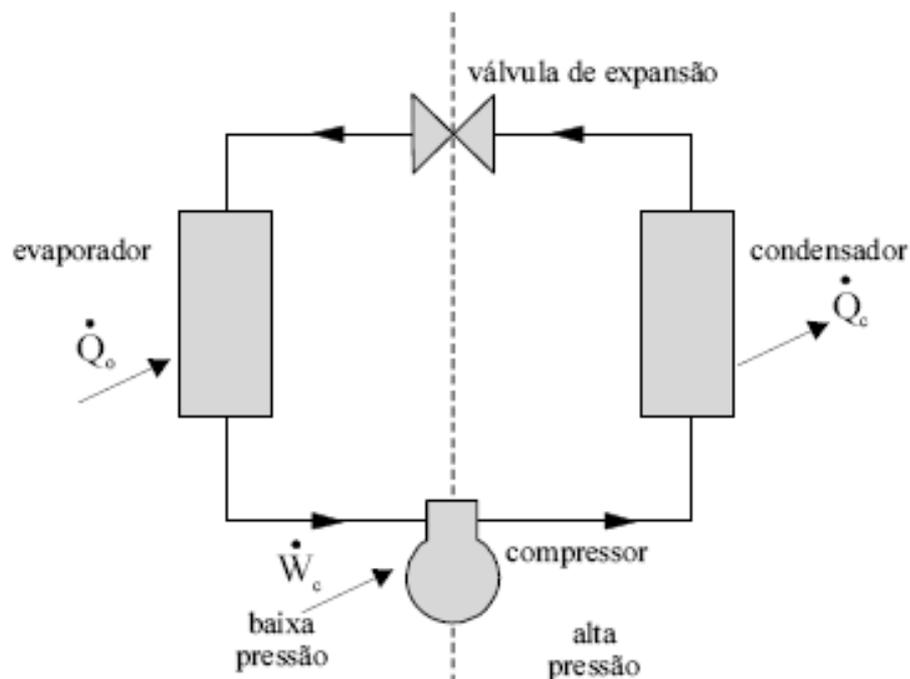
#### 4.3.2.2 Ciclo convencional de compressão de vapor

O ciclo de compressão de vapor é amplamente utilizado em sistemas de refrigeração e ar-condicionado, destacando-se por sua versatilidade e eficácia na manutenção de uma qualidade de ar interior confortável (Teixeira, 2024). Os componentes fundamentais desse sistema incluem o compressor, o condensador, o evaporador e a válvula de expansão (Khan; Kumar; Rohatgi, 2020).

O sistema de refrigeração por compressão de vapor baseia-se na compactação e expansão de um fluido refrigerante, transformando-o de líquido para vapor. Assim, o sistema absorve e libera calor à medida que o refrigerante muda de estado, diminuindo a temperatura do ambiente. Essa troca de calor é essencial para garantir a eficácia do sistema e o conforto térmico (Soni *et al.*, 2023).

O sistema inicia com o compressor, que aumenta a pressão e temperatura do refrigerante, transformando-o em vapor. Esse vapor libera calor no condensador e se torna líquido. O refrigerante líquido, sob alta pressão, passa pela válvula de estrangulamento e, no evaporador, absorve calor e sofre mudança de fase (Khan; Kumar; Rohatgi, 2020). A Figura 10 apresenta o diagrama esquemático do sistema de refrigeração por compressão de vapor.

Figura 10 - Diagrama esquemático do sistema de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: Refrigeração para todos (2016).

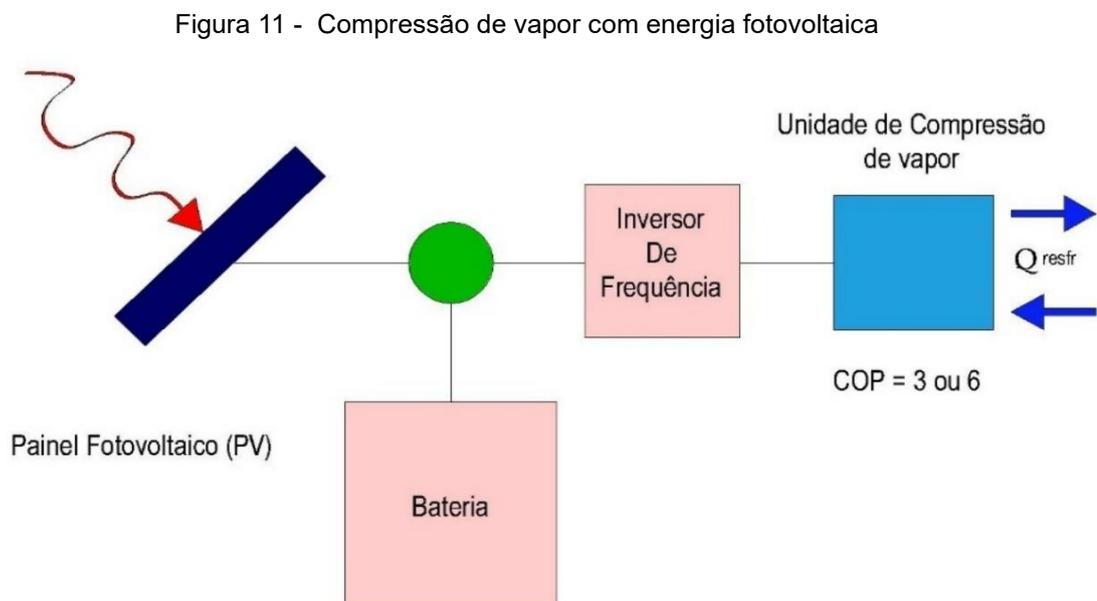
A Figura 10 apresenta um esquema do funcionamento do ciclo de compressão de vapor, no qual o processo 2-3 representa a condição de alta temperatura e pressão, caracterizada pela rejeição de calor do fluido refrigerante no estado de vapor. Conseqüentemente, o processo 4-1 reflete uma condição de baixa temperatura e pressão, durante a qual ocorre a absorção de calor pelo fluido refrigerante na fase líquida.

Em decorrência da rejeição e absorção de calor no fluido refrigerante, o Coeficiente de Performance (COP) é um termo alternativo à eficiência, comumente utilizado em termodinâmica. O COP é aferido como a razão entre a energia calorífica de saída e a energia calorífica de entrada, dada pela equação 3 (Kim; Ferreira, 2008).

$$COP = \frac{Q_{saída}}{Q_{entrada}} \quad (3)$$

É considerado relevante avaliar o processo de compressão, geralmente alimentado por potência elétrica (Teixeira, 2024). O consumo global de sistemas de resfriamento está aumentando, com previsões de triplicar até 2050 (Oh, 2019). A literatura aponta o uso de sistemas de compressão de vapor acionados por energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos (Al-Yasiri; Szabó; Arici, 2022).

A Figura 11 apresenta um esquema do sistema de compressão de vapor, acionado por energia elétrica proveniente de um painel fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de Otanicar, Taylor e Phelan (2012).

Esse sistema ilustra a integração da tecnologia de energia solar com o ciclo de compressão de vapor, demonstrando como a energia solar pode ser utilizada para impulsionar o funcionamento de sistemas de refrigeração e climatização.

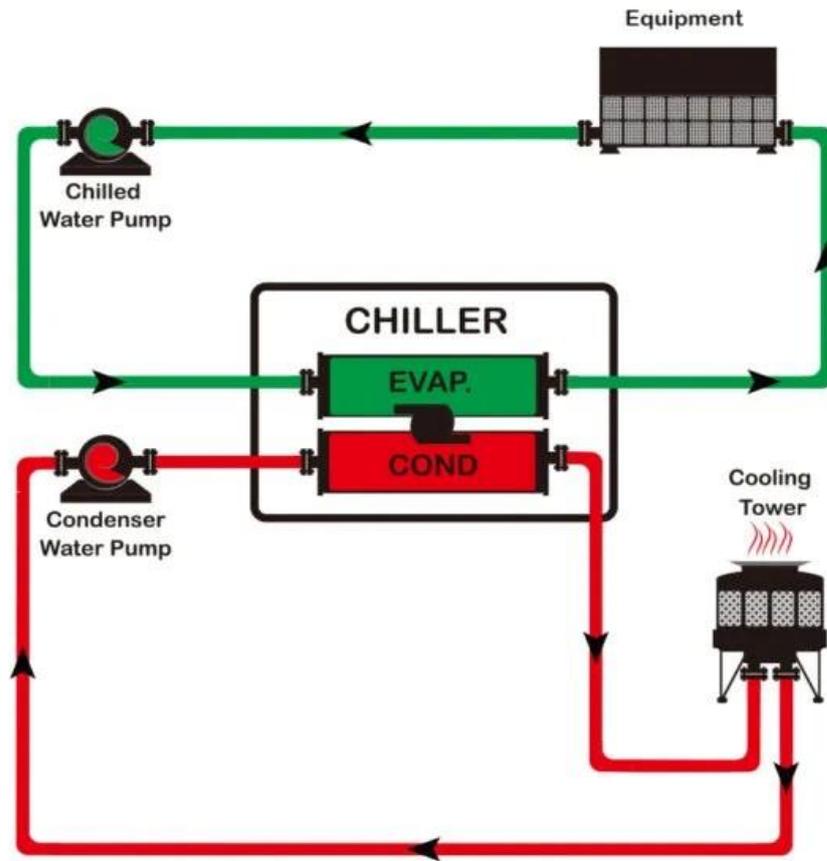
#### 4.4 RESFRIADORES DE LÍQUIDO

Os resfriadores de líquido correspondem aos componentes-chave de diversas instalações de grande porte, disponibilizando uma abordagem centralizada para atender às necessidades de resfriamento de forma eficiente. Esses sistemas são caracterizados pela presença de extensos equipamentos de resfriamento, normalmente localizados em uma única instalação ou distribuídos em instalações interconectadas (Rizkalla, 2024).

Esses resfriadores regulam a temperatura e a umidade do ambiente. A água, a uma temperatura elevada, entra no evaporador por meio de uma bomba que gera fluxo contínuo. A água absorve o calor do fluido refrigerante, resfriando-se antes de ser distribuída para a serpentina do ar-condicionado. Após a troca de calor com o ar, a água retorna ao sistema para nova circulação e processamento (Chen *et al.*, 2021).

A Figura 12 apresenta o fluxo de funcionamento de um resfriador de líquido do tipo *chiller*, utilizado em plantas de climatização de ambientes.

Figura 12 - Fluxo de funcionamento do resfriador de líquido



Fonte: Adaptado de *Scy Chiller* (2021).

Esse diagrama demonstra as etapas principais do ciclo de refrigeração, que incluem a evaporação, compressão, condensação e expansão do refrigerante. A compreensão desse fluxo é importante para entender como o *chiller* resfria líquidos ao absorver calor do ambiente e transferi-lo para o exterior de maneira eficiente.

Os resfriadores são equipamentos de refrigeração e podem ser classificados em duas categorias principais: os de compressão de vapor e os de absorção. Os sistemas de compressão de vapor utilizam um ciclo que comprime e expande um gás refrigerante para extrair calor de um fluido, resfriando-o antes de circulá-lo pelo ambiente. Por outro lado, os sistemas de absorção geram vapor refrigerante a partir de uma fonte de calor, que é então absorvido pela solução, criando um efeito de resfriamento, sendo especialmente úteis quando há calor residual disponível (Rizkalla, 2024).

Nos últimos anos, os *chillers* de absorção de vapor de efeito único têm sido explorados principalmente para integração com energia solar térmica, oferecendo uma solução sustentável para as crescentes necessidades de refrigeração e ar-

condicionado. Além dos sistemas de absorção de efeito único, há uma literatura considerável relatando a integração da energia solar térmica com sistemas de efeito duplo, triplo e outros (Sharma; Sharma; Ali, 2020).

Empresas como *LG Electronics*, *Johnson Controls*, *Carrier*, *Daikin* e *Yazaki* se destacam na fabricação de *chillers* por absorção, conforme o Relatório *HVAC Services Market* (2023). Elas são reconhecidas pela inovação e eficiência, consolidando-se como líderes no mercado de climatização e controle de temperatura.

A Figura 13 faz referência ao catálogo da *Yazaki Energy Systems*, que apresenta um resfriador de líquido WFC-S de efeito único, acionado por água, com capacidades de resfriamento variando entre 5, 10, 20, 30 e 50 toneladas de refrigeração.

Figura 13 - Resfriador de líquido modelo WFC-S (Yazaki)



Fonte: Adaptado do catálogo Yazaki (2024).

No equipamento apresentado na Figura 13, verifica-se que o ciclo de absorção é alimentado por água quente, com temperaturas entre 70 °C e 95 °C, proveniente de processos industriais, cogeração, energia solar ou outras fontes térmicas. O condensador é resfriado por uma torre de resfriamento, à qual é essencial para a eficiência do sistema, pois garante a remoção adequada do calor e otimiza o desempenho do resfriador de líquido.

A eficiência energética no contexto do funcionamento de equipamentos de climatização está diretamente relacionada à quantidade de carga térmica que deve ser removida ou adicionada ao ambiente. Essa relação é fundamental, pois determina a quantidade de energia elétrica que o equipamento consumirá para realizar as respectivas operações (ASHRAE, 2024).

Desse modo, a eficiência energética tem se destacado como um conceito relevante nas políticas de sustentabilidade e na conservação de recurso. O programa de certificação de construção eficiente emerge como um instrumento benéfico para a política governamental, com o objetivo de promover a redução do consumo de energia para as edificações em diversos países (Jeong; Kim, 2024).

Em âmbito global, uma diversidade de procedimentos de avaliação de edifícios e implementos ambientais, desenvolvidos por organizações e instituições especializadas, encontra-se em uso, enquanto outros ainda estão sendo criados. Dentre eles, destacam-se o *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) e o *British Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM). Essas ferramentas são projetadas para avaliar os edifícios e seu impacto sob a perspectiva das suas demandas de sustentabilidade (Addy; Adinyira; Ayarkwa, 2017).

As certificações oferecem uma abordagem estruturada e sistemática para avaliar e aprimorar o desempenho ambiental dos empreendimentos, levando em conta desde o planejamento, projeto e a construção e operação. Ao estabelecerem critérios e padrões rigorosos para a sustentabilidade, essas certificações incentivam a adoção de práticas mais eficientes, a redução de desperdícios e a incorporação de tecnologias limpas e inovadoras (Sugahara; Freitas; Cruz, 2021).

Dentre as mais utilizadas, encontra-se a classificação *Leadership Energy and Environmental Design* (LEED), que é um sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações, que tem como intuito de avaliar o desempenho ambiental em diversas categorias, como a eficiência energética, a qualidade do ar interior e o uso da água.

O Nível 1, denominado de Certificação LEED, é concedido aos projetos que alcançam entre 40 e 49 pontos. Essa certificação é atribuída aos edifícios que incorporam uma diversidade de recursos de design sustentável, como a utilização de iluminação eficiente em termos energéticos e a implementação de sistemas AVAC, que favorecem o consumo consciente de energia (Certificação LEED, 2024).

Em seguida, o Nível 2, que corresponde à classificação "Silver", é destinado a construções que obtêm entre 50 e 59 pontos. Para essa categoria, as estratégias adotadas podem contemplar níveis mais elevados de eficiência energética e hídrica, bem como a adoção de sistemas de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas. Dessa forma, esse nível de certificação destaca esforços adicionais em sustentabilidade (Certificação LEED, 2024).

A terceira categoria, conhecida como "Gold", é conferida aos prédios que alcançam entre 60 e 79 pontos. Essa certificação é concedida às edificações que incorporam tecnologias de ponta e estratégias de design inovadoras, as quais os diferenciam dos níveis de certificação anteriores. Os edifícios classificados como Gold demonstram um compromisso significativo com a sustentabilidade e a eficiência.

Por fim, o Nível 4, conhecido como "Platina", é concedido às construções que obtêm mais de 80 pontos. Esse grau máximo de reconhecimento representa o auge do design sustentável, sendo atribuído aos projetos que implementaram as estratégias de construção ecológica mais inovadoras e avançadas disponíveis no mercado. Assim, a certificação Platinum trata-se um indicativo de excelência em práticas de construção sustentável.

Para economizar energia em edifícios, as inovações em fachadas e sistemas de ar-condicionado térmico são fundamentais. Estratégias como o projeto bioclimático e a ventilação passiva reduzem a demanda energética. O objetivo é criar edifícios de energia zero ou positiva, os quais gerem e compartilham energia renovável, contribuindo para a sustentabilidade. A utilização de fontes de energia de baixa qualidade, como o calor residual, melhora a eficiência energética, atendendo a demanda de climatização (Rey-Hernández *et al.*, 2024).

Diante da necessidade de mensurar o desempenho energético de edifícios, foram desenvolvidos diversos métodos de carga ou modelos de consumo de energia que simulam um sistema de construção/planta para a previsão de carga ou estimativas de economia de custos (Harish; Kumar, 2016).

Desse modo, as ferramentas de simulação de energia desempenham um papel crucial na exploração de novas ideias e na análise do impacto de medidas de conservação de energia em edifícios, processos e sistemas energéticos (Muslim, 2021).

#### 4.5 FLUÍDO REFRIGERANTE

Desde o desenvolvimento do ciclo convencional de compressão de vapor no século XIX, a indústria da refrigeração tem evoluído constantemente. Com essa evolução, a busca por fluidos refrigerantes mais eficientes se intensificou, visando ganhos em escala econômica. No entanto, a partir do advento do Protocolo de Montreal, as preocupações relativas ao impacto ambiental provocadas pela classe de refrigerantes tornaram-se evidentes (Silva, 2019).

Além disso, nos últimos anos, a expansão do uso de tecnologias convencionais de climatização tem acentuado os impactos ambientais, tanto pelo elevado consumo de energia quanto pela integração de refrigerantes com potencial de aquecimento global significativo. Apesar da substituição gradual dos refrigerantes à base de clorofluorcarbonetos (CFCs) por hidrofluorcarbonetos (HFCs), esses ainda são considerados gases de efeito estufa, com um potencial aquecedor cerca de 1000 vezes superior ao dióxido de carbono (Paula *et al.*, 2020). Diante desse contexto, alternativas emergem, incluindo a melhoria da eficiência energética, o uso de refrigerantes menos prejudiciais e a adoção de fontes de energia renovável.

Essa necessidade de reduzir a pegada ambiental ocasionou o desenvolvimento de análises ambientais que quantificam os efeitos das mudanças climáticas. Por outro lado, os refrigerantes utilizados como fluidos de trabalho apresentam um sério impacto ambiental. De fato, os CFCs foram banidos, e os HCFCs estão em processo de eliminação, conforme os cronogramas definidos pelo Protocolo de Montreal, devido ao seu impacto negativo na camada de ozônio (Prieto *et al.*, 2019). No contexto atual, os hidrofluorcarbonetos (HFCs), como o R134a, são os refrigerantes mais comuns, mas possuem um potencial de aquecimento global (PAG) 1430 vezes maior que o do CO<sub>2</sub>.

Diante dessa realidade, a refrigeração por absorção de vapor surge como uma alternativa que permite o uso de refrigerantes e absorvedores ecológicos inovadores. Assim, os pares mais explorados para essa aplicação incluem o NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O e LiBr-H<sub>2</sub>O,

enquanto outros pares, como o  $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$  e o  $\text{LiCl-H}_2\text{O}$ , estão sendo investigados para aplicações específicas. Além disso, dentre esses pares, o  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  destaca-se por ter um potencial de aquecimento global zero e não causar efeitos degradantes para o meio ambiente (Jadhav; Raut; Kalamkar, 2023).

Esses sistemas de refrigeração têm a característica de operar com energia de baixa qualidade e utilizar refrigerantes ecológico (Sharma; Sharma; Ali, 2020). Além disso, o desempenho e a eficiência de um resfriador de absorção são determinados principalmente pelas propriedades termofísicas do par de fluidos de trabalho escolhido. A miscibilidade do refrigerante e do absorvente na fase líquida, dentro da faixa de temperatura operacional do ciclo de absorção, é um critério para a seleção adequada desses fluidos.

Os pares de fluidos de trabalho devem atender a outros critérios, como a estabilidade química, a não toxicidade, a não corrosividade e o custo acessível. É importante também que a diferença de temperatura entre os pontos de ebulição do refrigerante e do absorvedor seja elevada e o refrigerante deve ser volátil, permitindo a sua separação do absorvente dentro do gerador (Shirazi *et al.*, 2018).

A escolha adequada dos fluidos refrigerantes, combinada com tecnologias sustentáveis, é importante para a inovação na indústria da refrigeração, visando minimizar os efeitos negativos sobre o meio ambiente.

#### 4.6 BOMBAS MECÂNICAS

As bombas mecânicas são essenciais em sistemas de climatização por absorção, responsáveis por transportar a solução diluída do absorvente para o gerador (Sharma; Sharma; Ali, 2020). Sistemas de resfriamento solar com armazenamento a frio geralmente incluem coletores solares, resfriadores de absorção, tanques de armazenamento e múltiplas bombas. Essa estrutura otimiza a coleta e o uso da energia solar para resfriamento, mas sua implementação enfrenta desafios (Ibrahim *et al.*, 2024).

Um dos principais obstáculos à adoção de sistemas de absorção movidos a energia solar é o alto custo inicial e o consumo de eletricidade para o funcionamento de auxiliares, como torres de resfriamento e bombas (Ibrahim *et al.*, 2024). Portanto, são necessárias soluções que reduzam a dependência de energia elétrica convencional e tornem esses sistemas mais acessíveis.

Nesse contexto, as bombas de água solares surgem como uma alternativa viável, pois são utilizadas para a distribuição de água em aplicações domésticas, industriais e de irrigação. Em vez de depender da eletricidade da rede, uma bomba de água movida a energia solar utiliza eletricidade gerada por painéis fotovoltaicos ou energia térmica coletada do sol. Contudo, vale ressaltar que essas bombas ainda são utilizadas em escala modesta e seu emprego está em estágios iniciais de implantação (Pachaivannan; Manimuthu; Jegadeesan, 2024).

O estudo de Aljuhan e Dayem (2022) na Arábia Saudita analisou uma instalação de refrigeração por absorção com acionamento solar, utilizando energia fotovoltaica para operar bombas mecânicas em ambientes fora da rede elétrica. Os painéis alimentavam as bombas e outras cargas, alcançando uma eficiência de 70%. A integração de tecnologias renováveis melhora a eficiência do sistema e contribui para a sustentabilidade do processo de climatização.

Em síntese, a combinação de sistemas de climatização por absorção com soluções de bombeamento solar apresenta um caminho promissor para a eficiência energética e a redução dos custos operacionais. A adoção de bombas de água solares e a implementação de sistemas de resfriamento por absorção podem contribuir significativamente para um futuro mais sustentável. Portanto, é fundamental continuar explorando e desenvolvendo essas tecnologias, enfrentando os desafios financeiros e buscando inovações que tornem esses sistemas mais acessíveis e eficientes.

#### 4.7 CARGA TÉRMICA DE AMBIENTES

Em caráter global, a população e as atividades econômicas em áreas urbanas aumentaram consideravelmente nos últimos anos, resultando em mudanças significativas no ambiente térmico. O aumento da temperatura nas cidades pode ser atribuído à diminuição das áreas verdes e ao incremento do calor gerado por fontes artificiais, o que torna o fenômeno da ilha de calor um desafio para a sociedade (Hirano *et al.*, 2024).

A definição de conforto térmico é considerada relevante, pois se refere à condição mental em que o ser humano expressa satisfação com o ambiente térmico, sendo avaliada individualmente (ASHRAE, 2024). Para garantir um ambiente confortável em termos de temperatura e umidade, os sistemas de ar-condicionado são amplamente utilizados nos ambientes hospitalares, comerciais e residenciais, uma

vez que oferecem um desempenho eficiente no que diz respeito à regulação das condições do ambiente.

Diante disso, para o adequado dimensionamento do sistema de climatização, faz-se necessário definir a carga térmica dos ambientes, que se refere à quantidade de calor que deve ser removida (resfriamento) ou adicionada (aquecimento) a um determinado espaço, a fim de manter a temperatura e a umidade em condições desejáveis (ASHRAE, 2024).

Nesse contexto, a carga térmica dos ambientes é composta por duas frações de calor. A primeira corresponde à quantidade sensível, que provoca a variação da temperatura do ar sem alterar a umidade. A segunda é a porção latente, que ocasiona mudanças na umidade sem afetar a temperatura do ar.

Com isso, tanto os fatores externos quanto os internos dos ambientes devem ser considerados, uma vez que as condições externas, como a irradiação solar, que possuem um impacto direto no ambiente interno. Esse parâmetro é utilizado para calcular as características do ar relacionadas com a incidência solar em diferentes ocasiões e dias do ano (ASHRAE, 2024).

A Tabela 2 apresenta a caracterização das condições climáticas para algumas cidades da região do Nordeste brasileiro, permitindo uma compreensão mais detalhada de como as variáveis ambientais influenciam a carga térmica nos ambientes.

Tabela 2 - Dados ambientais da temperatura de São Luís

| MA              | São Luís    | latitude                    |      | longitude |      | altitude      | Pr atm | período |
|-----------------|-------------|-----------------------------|------|-----------|------|---------------|--------|---------|
|                 |             | 2,60 S                      |      | 44,23 W   |      | 53 m          | 100,69 | 84/01   |
| Mês >QT         | Freq. anual | Resfriamento e umidificação |      |           |      | Baixa Umidade |        |         |
|                 |             | TBS                         | TBUc | TBU       | TBSc | TPO           | W      | TBSc    |
| NOV             | 0,4%        | 34,1                        | 26,3 | 27,2      | 31,7 | 26,2          | 21,7   | 29,3    |
| $\Delta T_{md}$ | 1%          | 33,8                        | 26,3 | 26,9      | 31,4 | 25,9          | 21,3   | 29,1    |
| 7,4             | 2%          | 33,1                        | 26,1 | 26,7      | 31,1 | 25,3          | 20,6   | 28,3    |

Fonte: Adaptado da norma ABNT 16.401-1 (2008).

Com base no que foi apresentado na Tabela 2, é possível extrair dados importantes para o cálculo da carga térmica dos ambientes. A Temperatura de Bulbo Úmido (TBU) descreve a temperatura indicada por um termômetro, cuja parte do bulbo está envolvida em um pano molhado, enquanto a umidade (w) refere-se à quantidade

de vapor d'água contida no ar. As previsões para a frequência anual de umidade são de 0,4%, 1% e 2%.

A partir desses dados, é possível gerar um perfil teórico que permite avaliar com boa precisão a evolução da carga térmica ao longo das 24 horas do dia. Nesse sentido, o posicionamento da edificação em relação ao sol é relevante, uma vez que o ganho de calor por radiação solar direta deve ser considerado no estudo da carga térmica, pois influencia significativamente as condições internas do ambiente (Frota; Schiffer, 2001).

Outro ponto que se soma à orientação solar na fachada da edificação é a caracterização das paredes, pisos e tetos, que contribuem para a absorção do calor e para a elevação da temperatura do ambiente em relação ao ar. Essa interação influencia o desempenho térmico do espaço, uma vez que a capacidade de absorção de calor das superfícies varia conforme a irradiação solar recebida.

Assim, o metabolismo humano gera frações de calor sensível e latente em função da ocupação do ambiente, que são categorizadas de acordo com o grau de atividade desempenhada.

Dessa forma, a Tabela 3 apresenta as parcelas de calor sensível e latente aplicadas à carga térmica dos ambientes, com essas frações expressas em unidades do Sistema Internacional de Medidas (SI).

Tabela 3 – Taxa de calor liberada por pessoas

| <b>Nível de Atividade</b> | <b>Local</b>        | <b>Homem Adulto (W)</b> | <b>Ajustado (W)</b> | <b>Calor Sensível (W)</b> | <b>% Radiação de Calor Sensível</b> |
|---------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Sentado no teatro         | Teatro, noite       | 115                     | 60                  | 35                        | 30                                  |
| Sentado, trabalho leve    | Escritórios, hotéis | 70                      | 50                  | 45                        | 35                                  |
| Caminhando, trabalho leve | Caminho/andar       | 100                     | 55                  | 60                        | 45                                  |
| Trabalho moderado em pé   | Restaurante         | 190                     | 100                 | 90                        | 50                                  |

Fonte: Adaptado de norma ABNT 16.401-1 (2008).

Outra parcela relevante para o cálculo da carga térmica é o calor gerado pelos sistemas de iluminação e dissipado em função do funcionamento dos equipamentos. Para isso, a iluminação prevista no projeto deve ser considerada; caso não haja dados suficientes, devem-se utilizar as potências de iluminação apresentadas na Tabela 4.

Por outro lado, para os equipamentos, adota-se que cerca de 60% da potência nominal dos dispositivos elétricos é convertida em calor, excetuando-se os dispositivos cuja função esteja relacionada ao aquecimento (Frota; Schiffer, 2001). Quando não há valores específicos fornecidos pelos fabricantes, são utilizados os valores de referência apresentados na literatura, conforme ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Taxa de dissipação de calor pela iluminação

| Local                | Tipo de Iluminação | Nível de Iluminação (lux) | Potência Dissipada (W/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------|--------------------|---------------------------|--|
| Escritórios e Bancos | Fluorescente       | 500                       | 10                                     |
| Escritórios e Bancos | Incandescente      | 1000                      | 25                                     |
| Lojas                | Fluorescente       | 750                       | 20                                     |
| Lojas                | Incandescente      | 1500                      | 35                                     |

Fonte: Adaptado da norma ABNT 16.401-1 (2008).

As Tabelas 4 e 5 apresentam valores de referência estabelecidos em norma para o cálculo da carga térmica provenientes da iluminação, categorizando-os de acordo com a finalidade do ambiente, além dos valores relacionados ao calor dissipado por equipamentos médicos.

Tabela 5 - Taxa de dissipação de calor de equipamentos médicos

| Equipamento             | Nominal (W) | Máximo (W) | Média (W) |
|-------------------------|-------------|------------|-----------|
| Sistema de anestesia    | 250         | 177        | 166       |
| Cobertor elétrico       | 100         | 50         | 33        |
| Medidor de pressão      | 180         | 33         | 30        |
| Aquecedor de sangue     | 200         | 303        | 26        |
| Aquecedor de solução    | 200         | 33         | 30        |
| Luz cirúrgica           | 350         | 276        | 259       |
| Oftalmoscópio           | 180         | 276        | 259       |
| Estetoscópio            | 7           | 15         | 20        |
| Suction aparato         | 60          | 103        | 33        |
| Eletrocardiógrafo       | 300         | 173        | 133       |
| Instrumento de cirurgia | 220         | 27         | 58        |

Fonte: Adaptado da norma ABNT 16:401-1 (2008).

A umidade no ar é uma fonte importante de carga térmica, influenciando o conforto térmico e a qualidade do ar. Níveis baixos causam desconforto, enquanto níveis altos favorecem o crescimento de mofo e podem agravar alergias respiratórias. O controle adequado da umidade é crucial em projetos arquitetônicos e de engenharia, pois afeta o bem-estar, a saúde e a qualidade de vida dos ocupantes (Yu; Jiang; Zhang, 2023).

Em relação à determinação do calor gerado pelas fontes descritas, as condições internas desejadas são fundamentais para o dimensionamento da carga térmica, levando em consideração a zona térmica. Essa zona é composta por um conjunto de ambientes que compartilham o mesmo regime de utilização e perfil de carga térmica, permitindo que as condições exigidas sejam mantidas por um único dispositivo de controle ou atendidas por um único equipamento de climatização destinado exclusivamente a essa área.

Em função disso, a norma ABNT 7256 (2021) especifica as condições de ar para ambientes hospitalares, especialmente no que diz respeito à temperatura e umidade, que são essenciais não apenas para o conforto, mas também para a qualidade do ar. A Tabela 6 apresenta as condições recomendadas para um ambiente de UTI.

Tabela 6 - Condições recomendadas para ambientes hospitalares

| <b>Característica</b>     | <b>Valor</b>                          |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Tipo de Ambiente          | Unidade de Tratamento Intensivo (UTI) |
| Vazão Mínima Ar Insuflado | 6 Movimentações/hora                  |
| Temperatura (°C)          | 20-24                                 |
| Umidade Relativa (%)      | Máx. 60                               |

Fonte: ABNT 7256 (2021).

A Tabela 6 apresenta as condições internas recomendadas para o ambiente da UTI, que variam entre 20 e 24 °C de temperatura, com uma umidade relativa máxima de 60%.

## 5 METODOLOGIA

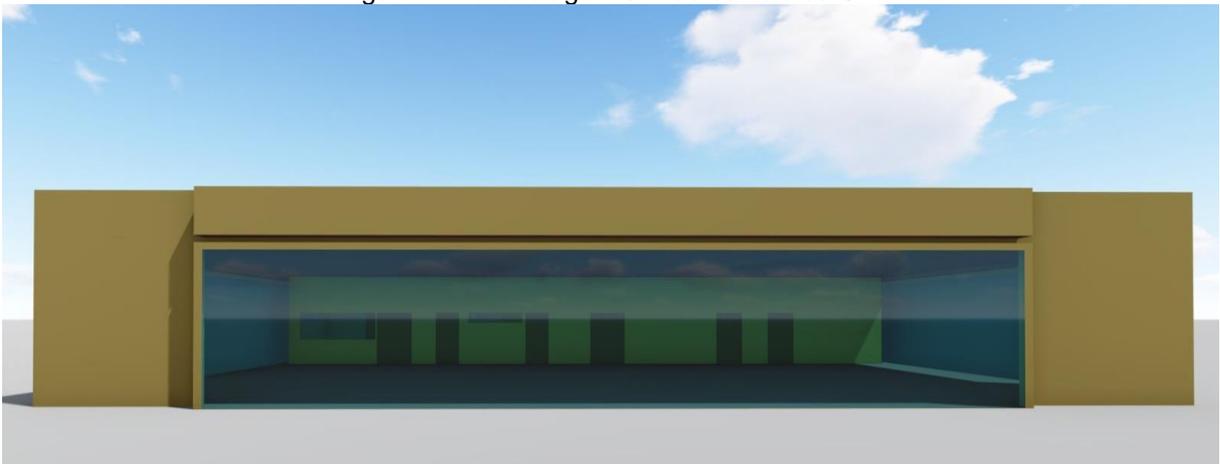
Trata-se de uma pesquisa de abordagem quantitativa, aplicada e exploratória acerca da proposta de dois sistemas de climatização para a UTI do HUUFMA, situada na região central de São Luís-MA. A UTI ocupa 228,66 m<sup>2</sup> com 11 leitos e opera 24 horas. Devido ao fluxo contínuo de pessoas e equipamentos, requer um sistema de climatização sustentável para garantir conforto térmico e reduzir custos operacionais.

Diante disso, propõe-se a instalação de dois sistemas de climatização, como o *chiller* por absorção e compressão de vapor. Para a realização da pesquisa, a primeira etapa correspondeu ao levantamento das características construtivas do edifício com base no memorial descritivo e na planta baixa pertencentes ao arquivo técnico do HUUFMA. Esse levantamento foi realizado entre os meses de maio e junho de 2024.

Na segunda etapa, foi realizada a consulta das condições termohigrométricas da cidade de São Luís, conforme as diretrizes estabelecidas pela norma da ABNT NBR 16401-2. Essa consulta contemplou a coleta de dados sobre as Temperaturas de Bulbo Seco (TBS) e a Temperatura de Bulbo Úmido (TBU), considerando uma frequência anual de 0,4%. Na terceira etapa da pesquisa, identificou-se o posicionamento solar do edifício em relação ao sol.

A Figura 14 apresenta a modelagem da UTI, com a caracterização dos elementos construtivos do edifício.

Figura 14 - Modelagem 3 D do edifício da UTI



Fonte: Elaboração própria (2024).

Além dos aspectos arquitetônicos observados na Figura 14, a quarta etapa correspondeu ao cálculo da carga térmica total, que foi realizado a partir do somatório

do levantamento das cargas individuais referentes à insolação, ocupação, equipamentos e ar externo (dada a equação 4). Esse dado foi obtido a partir das recomendações da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (Resolução nº 9 de 2003), que contemplam os requisitos de projeto e normas para diferentes particularidades de sistemas de climatização.

$$Carga\ térmica\ total = Q_{isol} + Q_{ocup} + Q_{equip} + Q_{ar\ ext} \quad (4)$$

$Q_{isol}$ : Representa a carga térmica devido à radiação solar.

$Q_{ocup}$ : Representa a carga térmica devido aos ocupantes.

$Q_{equip}$ : Representa a carga térmica devido aos equipamentos.

$Q_{ar\ ext}$ : Representa a carga térmica devido ao ar externo.

A partir da carga térmica total obtida, procedeu-se à seleção dos equipamentos (*chillers*), levando-se em consideração a potência necessária para atender à demanda e o COP mínimo estabelecido pela Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento e Refrigeração e Ar-condicionado (ASHRAE) para garantir eficiência energética. Os catálogos técnicos dos fabricantes foram consultados a partir do Relatório HVAC Services Market (2023).

Na quinta etapa da pesquisa, foram apresentadas duas propostas de sistemas de climatização. Em seguida, realizou-se um levantamento de artigos, como os estudos de Kim e Ferreira (2008), Prieto *et al.* (2019), Al-Yasiri, Szabó e Arici (2022), e Hasan *et al.* (2022).

Após a simulação energética de cada sistema proposto, realizou-se um comparativo da potência de acionamento, consumo energético e custo operacional. Para a apresentação didática dos resultados, utilizou-se fórmulas e equações apropriadas, a partir da literatura pertinente.

Esta pesquisa seguiu os princípios éticos estabelecidos para estudos em instituições de saúde, sendo autorizada pelo HUUFMA (Anexo A) com base nos protocolos que garantem o uso adequado dos dados da UTI. Foi solicitada uma carta de consentimento ao hospital via Rede de Pesquisa da Ebserh, aprovada pela GEP em 04/12/2024, garantindo a proteção dos direitos dos envolvidos e a integridade dos dados.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO EDIFÍCIO

A infraestrutura do edifício foi projetada com a presença de um conjunto de características construtivas que atendem às exigências funcionais e normativas para os ambientes hospitalares. Quanto às características dos edifícios, suas paredes internas foram construídas em blocos de tijolo cerâmico, contribuindo para o conforto dos pacientes e da equipe médica. As paredes externas apresentam uma combinação de materiais, como o bloco cerâmico e uma fachada em vidro de 6 milímetros, que integra o ambiente interno à paisagem externa.

Nesta pesquisa, para o cálculo da carga térmica total da UTI, foram consideradas, enquanto ambientes, a sala de guarda dos materiais estéreis, o posto de enfermagem, o salão coletivo e o leito de isolamento. Com base nas características construtivas do edifício, faz-se necessário analisar as condições termohigrométricas, identificação, posicionamento da edificação em relação ao sol e o cálculo da carga térmica dos ambientes da UTI.

### 6.2 CONDIÇÕES TERMOHIGROMÉTRICAS

No que diz respeito às condições termohigrométricas da cidade de São Luís, essa análise é considerada relevante, tendo em vista que os ambientes hospitalares exigem um controle rigoroso das condições climáticas para garantir o conforto térmico dos pacientes e a eficácia dos procedimentos realizados.

Foram considerados os valores de referência, que indicam uma TBS de 34,1 °C e uma TBU de 26 °C para a temperatura e de 21,7 g/kg de vapor d'água, com um índice de ocorrência anual de 0,4% em situações que exigem resfriamento e desumidificação para a Umidade Absoluta (UA). Essas condições termohigrométricas são relevantes para a implementação de ambientes confortáveis, assim como para a adequada performance dos sistemas de climatização de uma UTI. Além disso, faz-se necessário identificar o posicionamento da edificação em relação ao sol para estimar a carga térmica de insolação.

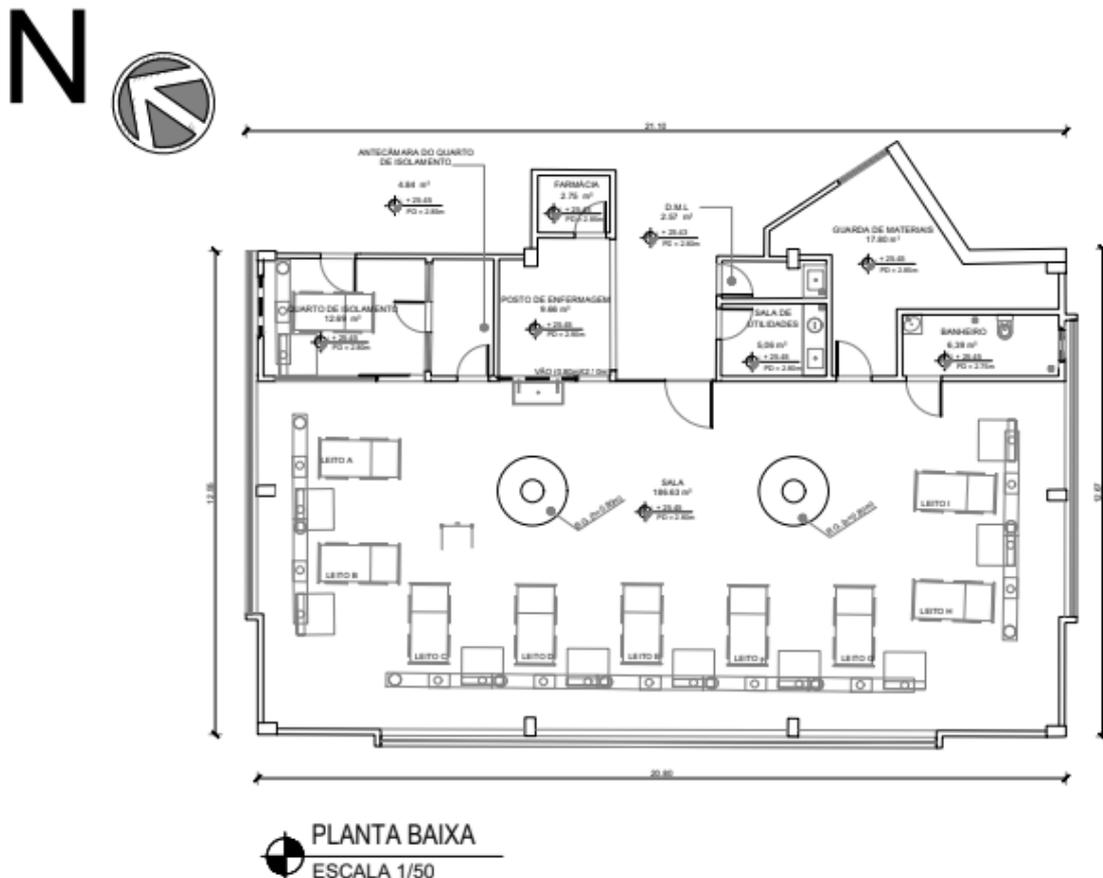
### 6.3 POSICIONAMENTO DA EDIFICAÇÃO EM RELAÇÃO AO SOL

Para analisar a irradiação solar da UTI estudada, faz-se necessário considerar a quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra, uma vez que esse fator pode influenciar diretamente o conforto ambiental, a eficiência energética e o desempenho térmico das construções.

Nesta pesquisa, a edificação que abriga o HUUFMA, está situada no Centro de São Luís do Maranhão, nas coordenadas 2°31'25"S 44°17'42"W. O sol poente, durante a maior parte do ano, está posicionado na direção Oeste, podendo variar entre Oeste-Noroeste e Oeste-Sudoeste.

A Figura 15 apresenta a planta baixa do edifício da UTI, acompanhada das orientações referentes ao posicionamento solar.

Figura 15 - Vista superior UTI adulto do HUUFMA



Fonte: Adaptado do arquivo técnico HUUFMA (2024).

Assim, observa-se a vista superior da região da UTI Adulto, localizada no 2º pavimento, com a indicação do norte geográfico, que é importante para a análise da

eficiência térmica do edifício, uma vez que a orientação solar influencia as condições internas de temperatura e visa compreender a posição solar no decorrer do dia.

Nesse entendimento, faz-se necessário especificar a carga térmica total dos ambientes da UTI, que se trata de um aspecto importante para o dimensionamento e a eficiência dos sistemas de climatização sustentável propostos nesta pesquisa. Portanto, essa abordagem contribui para otimizar o desempenho energético proposto no sistema de climatização desta pesquisa.

#### 6.4 CARGA TÉRMICA TOTAL DOS AMBIENTES DA UTI

Esta seção apresenta os principais aspectos que constituem o cálculo total da carga térmica da UTI do HUUFMA. A carga térmica total foi calculada a partir da soma das diversas parcelas que podem influenciar as condições ambientais, como a caracterização do calor decorrente da insolação, caracterização do calor gerado por pessoas, caracterização do calor dissipado pelos equipamentos e iluminação; e a caracterização do calor proveniente de ar externo.

Nesse sentido, as variáveis que compõem a carga térmica total serão descritas posteriormente para o desenvolvimento de um projeto de climatização sustentável.

##### 6.4.1 Caracterização do Calor Decorrente da Insolação

Matos (2017) especifica de que forma a radiação solar pode afetar as temperaturas das superfícies. O estudo considerou que as superfícies de coloração clara tendem a refletir uma maior radiação solar, o que reduz a absorção de calor e, conseqüentemente, reduz a carga térmica interna.

Todavia, as paredes direcionadas para o Oeste apresentaram uma variação considerada mais significativa, que alcança valores entre 3,9 K e 4,4 K no horário compreendido entre 16:00 e 19:00 horas. Essa combinação dos dados, representada por Matos (2017), evidenciou a necessidade de verificar as orientações das superfícies no controle da carga térmica decorrente da insolação da UTI. Tratando-se da incidência solar do forro (teto), o mapa de variação de temperatura oscilou entre 10,6 K e 3,9 K durante o intervalo entre 16:00 às 18:00 horas.

A partir das informações disponibilizadas pelo autor, avaliou-se nesta pesquisa o comportamento da variação de temperatura no decorrer do tempo com o intuito de

determinar o horário da carga térmica de pico, que no caso do presente estudo, ocorreu às 16:00 horas, com os seguintes valores de variação de temperatura: para as paredes direcionadas ao Noroeste, 2,8 K; para as paredes voltadas a Oeste, 3,9 K; e para o forro, 10,6 K.

A modelagem 3D da área da UTI Adulta, apresentada na Figura 16, fornece uma representação visual e quantitativa das dimensões físicas do edifício, além de destacar as características relevantes das paredes internas, externas e do piso.

Figura 16 – Modelagem 3D da UTI do HUUFMA



Fonte: Elaboração própria (2024).

A estrutura apresentada é constituída de paredes em alvenarias e estruturas em vidro temperado, que apresentam coeficientes de transmitância térmica ( $U$ ), que representam o fluxo de calor que perpassa o material.

A Tabela 7 compila os dados, que contemplam os coeficientes de transmitância térmica ( $U$ ), as áreas das superfícies expostas, as variações de temperatura ( $\Delta T$ ) e a carga térmica total em *watts*. Assim, essa informação permitiu uma análise mais aprofundada de cada superfície para a carga térmica da insolação do ambiente.

Tabela 7 - Carga térmica de insolação da UTI

|                            | U (W/m <sup>2</sup> .K) | Área (m <sup>2</sup> ) | ΔT(K) | Calor total (W) |
|----------------------------|-------------------------|------------------------|-------|-----------------|
| 1. Salão coletivo          |                         |                        |       |                 |
| Janela de vidro (Nordeste) | 6,49                    | 56,88                  | 29,4  | 10853,05        |
| Janela de vidro (Oeste)    | 6,40                    | 95,35                  | 48,3  | 29889,08        |
| Teto (laje de concreto)    | 3,22                    | 186,63                 | 10,6  | 6370,55         |
| Paredes externas           | 2,54                    | 56,67                  | 2,8   | 403,03          |
| 2. Leito de isolamento     |                         |                        |       |                 |
| Teto (Laje de concreto)    | 3,22                    | 12,69                  | 10,6  | 433,13          |
| 3. Sala de Prescrição      |                         |                        |       |                 |
| Teto (Forro de gesso)      | 3,22                    | 9,66                   | 10,6  | 329,71          |
| 4. Sala de material        |                         |                        |       |                 |
| Teto (Forro de gesso)      | 3,22                    | 17,80                  | 10,6  | 607,54          |
| Total                      |                         |                        |       | 48,86 kW        |

Fonte: Adaptado da norma ABNT 16.401-1 (2008).

Nesta pesquisa, os coeficientes de transmitância térmica encontram-se em conformidade com a NBR 15520-2, que dispõe sobre o desempenho térmico de edificações - métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.

Nesse entendimento, a Tabela 7 apresenta a carga térmica resultante da insolação em diversas superfícies da UTI. Após a análise dos dados apresentados, calculou-se a carga térmica de 48,86 kW (dada a equação 5), o que correspondeu a aproximadamente 13,91 TR.

$$Q = U * A * \Delta T \quad (5)$$

Q: taxa de transferência de calor (W)

U: Coeficiente global de transferência de calor (W/m<sup>2</sup>.K)

A: Área (m<sup>2</sup>)

ΔT: Diferença de temperatura (K)

Esses dados indicaram que, durante o período de máxima intensidade da radiação solar, a carga térmica que incide sobre o ambiente interno da UTI é considerada expressiva, o que exige um aporte energético significativo para a manutenção das condições de temperatura e conforto adequados para a ocupação humana.

### 6.4.2 Caracterização do Calor Gerado Por Pessoas

No que diz respeito à caracterização do calor gerado pela ocupação humana na UTI, a ABNT NBR 16401-2:2008 trata dos parâmetros de conforto térmico de ambientes e estabelece os critérios de avaliação para as cargas térmicas associadas à edificação, estipulando uma quantidade de  $n/100 \text{ m}^2$ . A aplicação desse critério proporcionou uma métrica padronizada, que pode variar significativamente em função da densidade ocupacional e das atividades realizadas no ambiente.

Para o dimensionamento do quantitativo de pessoas na UTI, verifica-se que não há uma descrição específica para o ambiente hospitalar proposto na norma. Assim, tomou-se como parâmetro a adoção dos escritórios para os ambientes de baixa densidade ocupacional. Logo, essa norma recomenda uma ocupação de 11 pessoas por  $100 \text{ m}^2$ , para os escritórios. Ao aplicar essa diretriz à área total da UTI, obteve-se um total de  $228,66 \text{ m}^2$  e uma ocupação total de 25 indivíduos.

No que tange à taxa metabólica dos indivíduos que ocupam o espaço físico da UTI, utilizou-se, nesta pesquisa,  $130 \text{ W}$  por pessoa para o nível de atividade de trabalho leve, conforme disposto pela norma de conforto térmico. A relevância dessa taxa metabólica reside em sua capacidade de fornecer uma estimativa da quantidade de calor gerado por cada ocupante na UTI.

A Tabela 8 apresenta o número de pessoas presentes na UTI, em conformidade com as diretrizes das cargas térmicas associadas à ocupação.

Tabela 8 – Carga térmica de calor gerado por pessoas

|                     | <b>Carga Térmica<br/>(W/pessoa)</b> | <b>Total de pessoas</b> | <b>Total de calor (W)</b> |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Sala de materiais   | 130                                 | 2                       | 260                       |
| Salão coletivo      | 130                                 | 19                      | 2470                      |
| Posto de enfermagem | 130                                 | 3                       | 390                       |
| Leito de isolamento | 130                                 | 1                       | 130                       |
| Total               |                                     | 25                      | 3250                      |

Fonte: Elaboração própria (2024).

Nesse contexto, a carga térmica decorrente do calor gerado pelas pessoas na UTI foi de  $3.250 \text{ W}$  ( $0,92 \text{ TR}$ ). Esse dado evidenciou o impacto da densidade ocupacional sobre as condições térmicas internas de cada ambiente da UTI, tendo em vista a necessidade de um sistema de climatização adequadamente dimensionado para assegurar o conforto dos ocupantes.

### 6.4.3 Caracterização do Calor Dissipado pelos Equipamentos e Iluminação

Para caracterizar o calor dissipado pelos equipamentos e iluminação, verifica-se a análise dos equipamentos instalados na UTI, uma vez que essa variável deve estar em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela Resolução nº 7 da ANVISA, datada de 24 de fevereiro de 2010, que assegura as condições operacionais para o atendimento dos padrões críticos para a segurança e o conforto dos pacientes.

Essa norma determina que cada UTI deve dispor de quarenta (40) equipamentos para a infusão contínua e controlada de fluidos, conhecidos como 'bombas de infusão', atividades típicas do ambiente hospitalar.

No que diz respeito à ventilação mecânica, a UTI está equipada com dez (10) ventiladores pulmonares mecânicos. Assim, a ventilação assistida é considerada relevante para os pacientes em estado crítico, uma vez que fornece o suporte respiratório necessário para assegurar a oxigenação adequada e a eliminação de dióxido de carbono.

Quanto ao monitoramento dos pacientes, a unidade conta com dez (10) monitores multiparamétricos, que desempenham um papel relevante na vigilância constante dos sinais vitais e das condições de saúde dos pacientes. Esse levantamento é considerado relevante para estimar a quantidade de calor decorrente da dissipação de calor dos equipamentos e dos sistemas de iluminação da UTI.

Outro aspecto relevante para a análise da dissipação de calor corresponde ao parâmetro de iluminação, que no caso da edificação da UTI, foi estabelecido em 30 W/m<sup>2</sup>. A Tabela 9 apresenta o número de equipamentos instalados na UTI, acompanhados de suas respectivas potências, incluindo as bombas de infusão, ventiladores, monitores e a iluminação.

Tabela 9 – Carga térmica de equipamentos e iluminação

| <b>Equipamentos</b>                                      |  |                        |                 |
|--|--|------------------------|-----------------|
|  | Potência (W)                           | Quantidade             | Carga total (W) |
| Ventilador mecânico (Fabricante <i>Dragüer</i> )         | 312                                    | 10                     | 3120            |
| Monitor Multiparâmetro (Fabricante <i>Nihon Kodhen</i> ) | 120                                    | 10                     | 1200            |
| Bomba de Infusão ( <i>Lifemed</i> )                      | 100                                    | 40                     | 4000            |
| <b>Iluminação</b>  |  |                        |                 |
|  | Potência dissipada (W/m <sup>2</sup> ) | Área (m <sup>2</sup> ) | Carga total (W) |
| Iluminação   | 30                                     | 236,34                 | 7080            |
| <b>Total</b>   |  |                        | <b>15.400</b>   |

Fonte: Elaboração própria (2024).

Assim, a análise dos dados apresentados pela Tabela 9 indicou que a carga térmica decorrente dos equipamentos e da iluminação foi de aproximadamente 15.400 W (4,38 TR).

#### 6.4.4 Caracterização do Calor Proveniente de Ar Externo

No que diz respeito à caracterização do calor proveniente de ar externo, deve-se seguir os padrões mínimos de qualidade do ar, conforme estipulado pela Norma Regulamentadora nº 9 da ANVISA, datada de 16 de janeiro de 2003, fornece uma orientação técnica referente aos padrões de qualidade de ar interior em ambientes de uso público e coletivo, sendo indicado o parâmetro mínimo de 27 m<sup>3</sup>/h por pessoa.

Essa norma define a quantidade total de ar externo necessária para garantir a qualidade do ambiente, sendo importante para o conforto e a segurança dos ocupantes, especialmente em ambientes críticos, como uma UTI.

A relevância dessa norma reside no fato de que a vazão de ar externo promove sua renovação, remove poluentes e odores, além de contribuir para um ambiente controlado. A Tabela 10 apresenta os valores da vazão de ar externo com base nas diretrizes estabelecidas pela ANVISA.

Tabela 10 – Carga térmica decorrente da vazão de ar externo

|   | Quantidade de pessoas | Vazão Total (m <sup>3</sup> /h) |
|---|-----------------------|---------------------------------|
| Vazão (para 27m <sup>3</sup> /h por pessoa) | 25                    | 675                             |
| <b>Total</b>                                |                       | <b>675</b>                      |

Fonte: Elaboração própria (2024).

Com base nos dados apresentados acerca da vazão de ar externo, a quantidade de renovação de ar foi calculada em 675 m<sup>3</sup>/h, levando em consideração

as condições termohigrométricas da cidade de São Luís, que incluem o padrão de densidade do ar de  $1,2 \text{ kg/m}^3$  e um calor específico de  $1.006 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ . Desse modo, levou-se em consideração a diferença de temperatura entre o ambiente interno e a TBS, com  $10,1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Esses parâmetros são fundamentais para a caracterização do calor gerado pela introdução do ar de renovação no ambiente.

A equação 6 apresenta o cálculo da carga térmica para a renovação de ar:

$$Q = cp * \rho * \Delta T \quad (6)$$

Onde,  $cp$  é o calor específico a pressão constante [ $\text{J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})$ ]

$\rho$  é a densidade do ar [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]

$\Delta T$  diferença de temperatura entre ar de entrada e saída [K]

Ao calcular essa expressão, obteve-se uma carga térmica proveniente da ventilação de  $226,45 \text{ W}$  (ou  $0,064 \text{ TR}$ ). Logo, esse dado da caracterização do calor proveniente de ar externo representou o aumento da energia necessária introduzida na UTI.

#### 6.4.5 Carga Térmica Total do Ambiente

Para o cálculo da carga térmica total do ambiente, a análise inicial concentrou-se no calor decorrente da insolação, que considerou diferentes fatores, como a área das superfícies do ambiente e a orientação solar do edifício. Durante o horário de pico da insolação, que foi determinada às 16:00 horas, a carga térmica associada à insolação totalizou-se de  $48.885,62 \text{ W}$  (aproximadamente  $13,91 \text{ TR}$ ), com base nas variáveis específicas de cada ambiente analisado.

Em seguida, a variável relacionada à ocupação humana, que considera uma ocupação de 25 pessoas para os ambientes da UTI, sendo obtido um calor estimado de  $3.250 \text{ W}$  (equivalente a  $0,92 \text{ TR}$ ). Esse dado destacou a interferência da densidade ocupacional nas condições térmicas internas, uma vez que cada pessoa emite uma parcela de calor, que pode impactar diretamente o ambiente.

A variável referente ao calor dissipado pelos equipamentos e pela iluminação indicaram que os ventiladores mecânicos, monitores multiparâmetros, bombas de

infusão e luminárias presentes no edifício contribuíram significativamente para o cálculo da carga térmica total, que totalizou em 15.500 W (4,41 TR). Esse somatório é considerado relevante para compreender o impacto térmico dos dispositivos presentes na UTI, garantir um ambiente seguro e eficiente para o ambiente assistencial.

Posteriormente, a carga térmica proveniente do ar externo foi calculada com base na norma da ANVISA, que estipula uma renovação mínima de ar de 27 m<sup>3</sup>/h por pessoa. Para uma ocupação de 25 pessoas, a vazão total de ar externo foi estabelecida em 675 m<sup>3</sup>/h, que resultou em uma carga térmica adicional de 2.665 W (0,67 TR), levando em conta as condições termohigrométricas da região.

Dessa forma, a carga térmica total da UTI foi resultante do somatório das contribuições supracitadas (Tabela 11), que pode ser expressa da seguinte forma:

Tabela 11 – Carga térmica total

| <b>Tipo de Carga Térmica</b>                  | <b>Valor (W)</b> | <b>Valor (TR)</b> |
|---|------------------|-------------------|
| Carga Térmica devido à Insolação              | 48.885,62        | 13,91             |
| Calor gerado por ocupação humana              | 3.250            | 0,92              |
| Calor dissipado por equipamentos e iluminação | 15.500           | 4,41              |
| Calor proveniente do ar externo               | 226,45           | 0,064             |
| <b>Carga Térmica Total</b>                    | <b>67.862,07</b> | <b>19,3 TR.</b>   |

Fonte: Elaboração própria (2025).

Com base na Tabela 11, verificou-se que o cálculo da carga térmica total foi de 67,86 kW (ou 19,3 TR) para a UTI estudada, o que ficou evidente é que para atender a essa demanda, propõe-se especificar um equipamento de climatização para suprir o calor gerado e ser eficiente em termos de sustentabilidade.

Ao considerar o calor gerado e as especificações de desempenho necessárias para a arrefecer o ambiente proposto, deve-se requisitar um sistema de climatização com a capacidade igual ou superior a 67,86 kW (ou 19,3 TR), uma vez que essa potência se alinha com o dado estimado obtido pela carga térmica total.

Nesse contexto, propõe-se um sistema de climatização em conformidade com as necessidades específicas da UTI. Com essa finalidade, a literatura acerca de sistemas de climatização apresenta alternativas de acionamento por fonte renovável (*chiller* por absorção) e por sistema elétrico de potência convencional (*chiller* por compressão de vapor).

## 6.5 PROPOSTAS DE SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO

Nesta pesquisa, diante da necessidade de suprir a demanda de conforto térmico da UTI, dois sistemas de climatização de ar-condicionado foram propostos. O primeiro denominado de *chiller* por compressão de vapor (acionado por energia elétrica) e o segundo de *chiller* por absorção (acionado por energia solar), ambos com o intuito de atender as especificidades do ambiente hospitalar.

Enquanto a primeira proposta teve como característica o acionamento de um sistema convencional de climatização, a segunda proposta foi fundamentada na utilização de uma fonte de energia renovável, cujo diferencial é contribuir para a sustentabilidade energética da UTI.

### 6.5.1 Proposta do *Chiller* por Compressão de Vapor

Ao propor um sistema de climatização de *chiller* por compressão de vapor, deve-se considerar diversas características, como a sua aplicabilidade convencional, seu aspecto compacto, a eficiência energética e a disponibilidade de energia por parte concessionária pública. Essas particularidades tornam o sistema de compressão de vapor mais utilizado em diversos ambientes que demandam climatização, como os espaços de uma UTI.

Para propor esse sistema, deve-se identificar as especificações de um equipamento, que tem como característica a utilização de um compressor mecânico alimentado por energia elétrica. Assim, faz-se necessário identificar a demanda energética desse equipamento, a seleção do *chiller*, a eficiência energética, a fonte de energia de acionamento e o consumo energético para funcionamento.

Acerca da demanda energética, faz-se necessário considerar os custos de operação dos dispositivos que constituem o equipamento por compressão de vapor, tendo em vista que essa proposta é uma aplicação convencional que demanda energia proveniente da concessionária pública. Atrelado a isso, no Brasil há uma variação das tarifas de energia ao longo do dia, particularmente durante os períodos de regime tarifário de ponta, que encarece o seu fornecimento.

Assim sendo, a avaliação energética é um aspecto considerado relevante para prever a demanda de energia necessária para operar o *chiller* por compressão de vapor. Além disso, visa implementar um sistema de climatização convencional para

uma UTI e permitir uma estratégia direcionada à redução de custos do sistema de compressão de vapor. Logo, considera-se que sistemas convencionais são os mais frequentes nas instalações de climatização.

No que diz respeito à demanda de climatização (carga térmica total) da UTI, o processo de seleção do *chiller* é considerado um aspecto relevante, uma vez que a partir dessa escolha, as cargas térmicas de resfriamento devem ser determinadas ao considerar as cargas individuais e simultâneas do edifício. Nesse sentido, o que vai determinar a seleção do *chiller* por compressão de vapor é a carga térmica total do ambiente, uma vez que essa demanda resulta de diferentes fatores, como a ocupação humana e as condições ambientais.

Nesta pesquisa, a carga térmica total calculada para a UTI foi de 69 kW, sendo necessário identificar um equipamento de *chiller* que possa atender à demanda energética de forma eficiente e segura. Para isso, a partir dessa demanda, os catálogos técnicos dos *chillers* disponíveis no mercado foram consultados, em que foi possível identificar os equipamentos que possam atender as particularidades da carga térmica total da UTI, levando em consideração a eficiência energética do equipamento.

Nessa proposta estudada, verifica-se a relevância do dimensionamento necessário do equipamento para garantir o desempenho ideal do sistema de climatização para a UTI estudada. Jia *et al.* (2023), discutiram a importância do dimensionamento adequado dos *chillers* para aplicações comerciais, tendo em vista que um superdimensionamento pode ocasionar uma ineficiência operacional. Isso ocorre, uma vez que essas abordagens podem não levar em consideração a incerteza do perfil de carga horária anual, o que pode resultar na seleção de *chillers* de grande porte que operam com baixa eficiência energética.

Dessa forma, a inserção de uma margem de segurança para o dimensionamento do *chiller*, apesar de ser considerada comum nos projetos tradicionais de climatização, pode contribuir para o superdimensionamento, uma vez que geralmente os equipamentos são selecionados com uma potência de refrigeração superior à carga térmica total calculada.

Nesta pesquisa, em relação a seleção do *chiller* por compressão de vapor, considera-se que a obtenção de sua margem de segurança, sendo necessário estimar o custo operacional desse equipamento. Logo, esse custo depende do Coeficiente de

Desempenho (COP), que se trata da capacidade do equipamento de converter energia elétrica em térmica.

A norma da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento e Refrigeração e Ar-condicionado (ASHRAE, 2019) estabelece que, para os *chillers* com acionamento elétrico, o COP mínimo deve ser de 2,98 (W/W) em condições de carga máxima do equipamento. Tal exigência ressalta a importância da seleção de equipamentos que atendam às necessidades de resfriamento e operem de forma eficiente, contribuindo para a redução do consumo energético em sistemas de climatização.

Em relação à eficiência energética, com base nessas diretrizes de seleção do equipamento, realizou-se uma consulta ao catálogo técnico do fabricante da linha comercial *Trane*, em que foram analisadas a sua potência frigorífica e a sua COP.

Então, verificou-se que o sistema de *chiller* modelo CGAD025, com capacidade de refrigeração de 25 TR, atende de forma integral à demanda da carga térmica total calculada para a UTI. Além disso, esse modelo apresentou um EER de 1,273 kW/TR, que supera os requisitos propostos pela Norma de Energia para edifícios da ASHRAE. Dessa forma, a escolha do *Trane* CGAD025 atende às exigências normativas e assegura um desempenho energético otimizado para o sistema de climatização da UTI.

Assim, o desempenho energético otimizado é considerado relevante para traçar o perfil de consumo de energia, conforme descrito pelos estudos de Abreu *et al.* (2022), que realizaram uma análise termoeconômica e termoambiental do sistema de água gelada em um shopping center da cidade de João Pessoa-PB. Os autores ressaltaram a importância de considerar os custos monetários da eletricidade praticados pela concessionária local, além da análise detalhada do perfil de demanda energética do edifício, ao traçar as condições de consumo de energia. Nesse sentido, essa análise de demanda energética é fundamental para garantir que o sistema de climatização atenda às exigências de resfriamento e opere de forma eficiente, otimizando o consumo de energia e reduzindo os custos operacionais.

Com base nas variáveis para a seleção do *chiller* de compressão de vapor, pode-se tomar decisões mais assertivas para a sua seleção e o dimensionamento dos seus equipamentos (Abreu *et al.*, 2022), alinhando-se às melhores práticas recomendadas pelos normativos pertinentes do setor de refrigeração, aquecimento e ar-condicionado, conforme a norma da ASHRAE 90.1-2019.

No caso específico do *chiller* de compressão de vapor para o ambiente da UTI, o catálogo técnico de produtos da linha de resfriadores de líquido da *Trane* apresenta uma eficiência nominal de 1,273 kW/TR. Isso significa que para cada tonelada de refrigeração fornecida, o catálogo identifica que o equipamento de *chiller* consome 1,273 kW de energia (Trane, 2024).

Logo, quanto à fonte de energia de acionamento, verifica-se que a descrição da eficiência nominal do *chiller* é considerada relevante para esta pesquisa, pois esse dado é necessário para a simulação energética de um cenário de regime tarifário. Esse mecanismo regulatório apresenta horários de maior e menor consumo de energia, que podem acarretar custos operacionais para a simulação energética do sistema proposto e torná-lo inviável. Nesta pesquisa, para a simulação energética do *chiller* por compressão de vapor, optou-se por uma tarifa verde de energia para o horário de ponta e fora de ponta, com o intuito de estimar o cálculo do custo de consumo de energia elétrica para a cidade.

Segundo os dados da concessionária pública Equatorial de Energia (2024) para o âmbito atual de consumo de energia, considerou-se uma tarifa de 0,41 R\$/kWh para o horário fora de ponta e 2,95 R\$/kWh para o horário de ponta, ambos para as instalações comerciais do subgrupo A4 (2,3 kV a 25 kV).

Dessa forma, realizou-se a simulação energética para o sistema de compressão de vapor, considerando o funcionamento de 24 horas, sendo simulado o consumo de energia em dois intervalos tarifários distintos: 3 horas durante o período de ponta (18:00 às 20:59) e 21 horas fora de ponta.

Nesse contexto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define o sistema tarifário de ponta como aquele caracterizado por um período de maior consumo em um intervalo diário de três horas consecutivas. Esse período não inclui os sábados, domingos e feriados nacionais, sendo projetado para refletir os horários de pico para o uso de energia elétrica (ANEEL, 2024).

Para a apresentação dos dados de energia consumida, considerou-se a potência de acionamento, o tempo de operação e a tarifa regulada pela concessionária pública de energia elétrica (dada a equação 7).

$$E = P * \Delta t * tarifa \quad (7)$$

Custo total de energia elétrica:

$P$ : Potência requerida (W)

$\Delta t$ : variação de tempo (h)

Tarifa: valor praticado concessionária (R\$/kWh)

A Tabela 12 fornece uma visão abrangente do consumo energético para o funcionamento do sistema de climatização da UTI, com destaque para a análise da eficiência energética e econômica.

Tabela 12 – Simulação energética para o *chiller* de compressão de vapor

| Descrição               | Durante a Ponta | Fora de Ponta | Total Diário | Total     |
|-------------------------|-----------------|---------------|--------------|-----------|
| Potência (kW)           | 30,54           | 30,54         |              |           |
| Horas de operação (h)   | 3               | 21            |              |           |
| Energia consumida (kWh) | 91,62           | 641,34        | 732,96       | 21.988,8  |
| Tarifa (R\$/kWh)        | 2,95            | 0,41          |              |           |
| Custo Diário (R\$)      | 270,31          | 263,15        | 533,46       |           |
| Custo Mensal (R\$)      |                 |               |              | 16.003,80 |
| Custo Anual (R\$)       |                 |               |              | 192.045,6 |

Fonte: Elaboração própria (2024).

Assim sendo, os dados indicaram a complexidade dos custos, segmentando-os entre os períodos de ponta e fora de ponta, o que é fundamental em um contexto em que as tarifas de eletricidade podem variar significativamente.

Inicialmente, o custo diário para o período de horário de ponta foi de R\$ 270,31, enquanto o custo durante o período fora de ponta foi de R\$ 263,15, o que demonstrou a diferença substancial no consumo de energia e nos custos associados à operação do *chiller*. Essa disparidade reforçou a importância de um gerenciamento eficaz da demanda energética por parte do sistema de climatização.

Nesse entendimento, ao avaliar o consumo energético para 24 horas, o seu custo mensal total foi de R\$ 16.003,80, enquanto o custo anual foi de aproximadamente R\$ 192.045,60, o que evidenciou um impacto financeiro significativo que a demanda de um sistema de climatização exerce sobre o orçamento de uma instituição de saúde.

Nesta pesquisa, constatou-se que as condições tarifárias impostas pela concessionária de energia resultam em um custo aproximadamente 7,2 vezes maior durante o horário de ponta do que fora de ponta (R\$ 0,41 e R\$ 2,95). Assim, para operar no mesmo nível de potência, os gastos do consumo de energia elétrica fora de ponta podem ser significativamente elevados, o que destaca a importância de um

gerenciamento eficiente de tecnologias direcionadas para a redução do consumo energético de uma UTI.

Lin *et al.* (2024) investigaram a regulação flexível de sistemas de ar-condicionado em aeroportos, considerando tarifas diferenciadas do tipo *Time-of-Use* (TOU). Os autores analisaram dois cenários: um com resfriamento fornecido apenas por *chillers* de compressão de vapor acionados por energia elétrica, e outro com um sistema híbrido, que combina energia elétrica e solar renovável.

Os estudos de Lin *et al.* (2024) mostraram que, nos cenários com *chillers* exclusivos, o consumo de energia atinge picos durante períodos de alta demanda, aumentando os custos operacionais devido aos preços elevados da TOU. Ao introduzirem uma abordagem flexível de deslocamento de carga, ajustando a operação durante os períodos de preços mais altos, conseguiram reduzir significativamente os custos de energia. O uso de sistemas híbridos resultou em uma redução de aproximadamente 35% no consumo de energia em comparação com o cenário de demanda da rede elétrica.

Em uma análise mais aprofundada, Shirazi *et al.* (2018) destacaram uma revisão abrangente e crítica dos *chillers* de absorção movidos a energia solar, cujos resultados da otimização revelaram que, dentre as configurações propostas, os *chillers* por absorção acionados por energia solar apresentaram uma melhor relação entre o desempenho energético, econômico e ambiental. Para o *chiller* por absorção, houve uma redução na demanda por energia primária e nas emissões de CO<sub>2</sub>, que variaram entre 44,5–53,8% e 49,1–58,2%, respectivamente, em comparação com os sistemas convencionais de referência.

Nesta pesquisa, o sistema de climatização por compressão de vapor apresenta como limitação o elevado consumo de eletricidade por unidade de área, comprometendo a sua eficiência energética e tornando a sua operação onerosa. Essa dependência de energia elétrica pode ocasionar variações nos custos de energia, criando um cenário desafiador para a viabilidade econômica, especialmente em instalações de grande porte, como os ambientes hospitalares. Além disso, os elevados custos operacionais podem inviabilizar a utilização desses sistemas tradicionais em áreas que exigem uma demanda constante de resfriamento (Rodríguez-Toscano *et al.*, 2022).

Nesse âmbito, os estudos de Rodríguez-Toscano *et al.* (2022) consideram que os sistemas de resfriamento por compressão de vapor apresentam diversas

desvantagens significativas. Assim, o uso de *chillers* de compressão de vapor apresenta diversas limitações significativas relacionadas ao consumo energético e ao impacto ambiental. Tocchio *et al.* (2024) ressaltaram que o uso intensivo de ar-condicionado, especialmente em cenários de alta demanda, pode exercer uma pressão substancial no sistema elétrico do Brasil, com um consumo de energia elétrica variando entre 40,82 TWh e 53,52 TWh até 2035, dependendo das condições.

Além disso, Karami e Jalalizadeh (2023) observaram que o maior consumo energético desses sistemas resulta em custos operacionais elevados quando comparados aos *chillers* de absorção. Narayanan, Harilal e Golder (2021) também enfatizam que os *chillers* de compressão de vapor dependem de fontes de energia intensivas, o que contribui para emissões de carbono e agrava ainda mais as suas limitações do ponto de vista ambiental e econômico. Além disso, os sistemas de compressão de vapor podem ser utilizados em conjunto com painéis solares (Kim; Ferreira, 2008).

Diante das análises apresentadas anteriormente, que destacam a eficiência energética e os custos operacionais do sistema de compressão de vapor, faz-se necessário investigar a viabilidade de uma segunda proposta considerada sustentável.

### **6.5.2 Proposta de um Sistema Sustentável *Chiller* por Absorção**

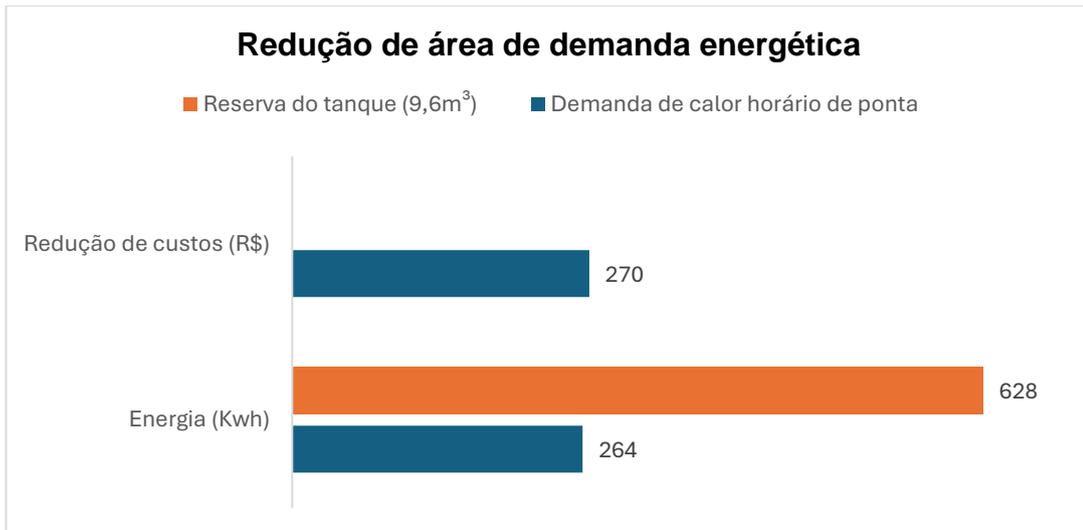
Ao propor esse sistema de climatização, é necessário destacar que a UTI do HUUFMA requer uma demanda de resfriamento contínua em decorrência das atividades desempenhadas pela equipe assistencial. Assim, a seleção de um *chiller* por absorção deve considerar a configuração técnica do equipamento, os componentes e a integração dos coletores solares.

É relevante especificar como a energia térmica em um sistema de *chiller* por absorção será captada durante o pico de incidência solar e armazenada para uso posterior, garantindo a eficiência do sistema de ar-condicionado em períodos de baixa irradiação. Desse modo, o armazenamento proveniente do calor para o acionamento de um *chiller* por absorção é considerado benéfico para a UTI e para a gestão estratégica, tendo em vista o consumo energético em horários de demanda de pico.

Para propor um sistema de climatização de *chiller* por absorção, deve-se tomar como base o acionamento de uma potência superior à carga térmica total, que foi

calculada em 67,86 kW nesta pesquisa, ou aproximadamente 19,3 TR, dado obtido a partir do somatório de todas as parcelas de calor geradas nos recintos da UTI. A Figura 17 apresenta a comparação da demanda energética entre o *chiller* e os coletores solares.

Figura 17 – Redução de área de demanda energética



Fonte: Elaboração própria (2024).

Logo, com base nessa demanda de carga térmica total, consultaram-se os catálogos técnicos dos fabricantes de *chiller* por absorção, para identificar as especificações da potência de refrigeração, o coeficiente de performance e as características de acionamento. Logo, a partir dessas informações, verificou-se que o fabricante do modelo *Carrier* 16LJ atendeu a potência estimada com margem de segurança.

Desse modo, os parâmetros do *chiller* por absorção do modelo *Carrier* 16LJ apresentam as especificações necessárias para atender à demanda de climatização da UTI, especialmente durante os períodos de pico de insolação e em horários de alta demanda de consumo de energia. Esse sistema tem como característica a sua eficiência energética e um enfoque sustentável.

Esse equipamento possui uma capacidade frigorífica de 88 kW, um COP de 0,70, uma energia térmica de aproximadamente 125,71 kW de acionamento e um fluido refrigerante LiBr/H<sub>2</sub>O. Além disso, possui como característica a sua superfície de transferência de calor de alta eficiência, cargas críticas de resfriamento, redução

de energia elétrica e flexibilidade nas estratégias de resfriamento. Essas informações foram disponibilizadas a partir do catálogo técnico do fabricante (*Carrier*, 2024).

Diante disso, conforme o catálogo técnico, o modelo 16LJ apresenta três configurações de potência, mas nesta pesquisa considerou-se 88 kW, 140 kW e 176 kW. No entanto, para atender a uma carga térmica de 67,86 kW da UTI, as potências de 140 kW e 176 kW encontram-se superdimensionadas, pois superam a carga necessária em 69,73 kW e 105,73 kW, respectivamente. O *chiller* de 88 kW, por sua proximidade com a carga requerida, oferece uma margem de segurança para atender aos picos de demanda, garantindo uma eficiência energética e um custo operacional reduzido.

Diante das especificações apresentadas, conforme demonstrado anteriormente, o modelo *Carrier* 16LJ foi selecionado após a realização de uma avaliação do catálogo técnico do próprio fabricante, levando em consideração a carga térmica calculada para a UTI. Desse modo, a seleção desse *chiller* por absorção levou em conta diferentes aspectos, como as características construtivas, a ocupação humana e o clima da cidade de São Luís-MA.

Nesse entendimento, ao tratar sobre o acionamento de *chiller* por absorção, a literatura fundamenta a sua aplicabilidade, como os estudos de Jia *et al.* (2023), que investigaram o aperfeiçoamento de sistemas de *chillers*. Esses achados ressaltaram a importância de considerar a incerteza da carga de resfriamento do ambiente, que é afetada por diferentes fatores, como o clima, as características construtivas e os padrões de ocupação.

A literatura sobre o sistema de climatização de *chiller* por absorção apresenta características técnicas específicas relacionadas à integração de energia solar, como os estudos de Pintaldi *et al.* (2015), que realizaram uma revisão de tecnologias de armazenamento de energia térmica e abordagens de controle para resfriamento solar. Outro estudo relevante acerca de otimização de *chiller* por absorção foi o de Ibrahim *et al.* (2024), que investigaram o resfriamento solar com resfriadores de absorção, armazenamento de energia térmica e as estratégias de controle.

Pintaldi *et al.* (2015) e Ibrahim *et al.* (2024) evidenciaram a utilização de coletores solares térmicos que convertem a radiação solar em energia térmica, essa absorção de energia solar é considerada relevante para o funcionamento do *chiller*. Nesses estudos, os *chillers* em sistemas solares podem alcançar um coeficiente de

desempenho entre 0,5 e 1,2, dependendo das condições operacionais, do tipo de fluido de trabalho e da temperatura de entrada.

Diante desses dados, considera-se que, para alcançar a eficiência dos *chillers* em sistemas solares, torna-se importante especificar o dimensionamento do coletor solar para garantir o acionamento eficiente do *chiller* de absorção. Nesta pesquisa, optou-se pelo coletor solar de tubo evacuado, tendo em vista a sua eficiência e uma maior conversão de energia térmica.

Shirazi *et al.* (2018) destacam que os coletores solares térmicos de baixa temperatura, como os modelos de placa plana e tubo evacuado, são adequados para fornecer água quente aos resfriadores de absorção de efeito único. Contudo, os coletores de tubo evacuado se destacam por sua capacidade de atingir temperaturas mais elevadas, chegando até 150°C, enquanto mantêm um nível de eficiência aceitável.

Acerca da classificação do tipo de coletor solar, os estudos de Assilzadeh *et al.* (2005) utilizaram um sistema de absorção alimentado por coletor solar de tubo evacuado em climas tropicais, como o da Malásia. Os achados indicaram que um coletor solar de tubo evacuado com uma área dimensionada de 35 m<sup>2</sup> (10 m<sup>2</sup>/kW de resfriamento) foi considerado apropriado para o sistema do estudo.

Considerando-se o coletor solar de tubo evacuado, Bellos e Tzivanidis (2017) examinaram o desempenho energético e a viabilidade de sistemas de climatização em diversas cidades. Dentre esses estudos realizados nas regiões, verifica-se que o tubo evacuado possui um melhor aproveitamento de fração solar.

No presente estudo, após a seleção do coletor do tipo tubo evacuado a partir das suas dimensões e área das placas dos coletores solares, indicou-se um coletor solar do tipo tubo evacuado do fabricante *Sunflower*, modelo SFB305818, que visa atender às demandas de acionamento do *chiller* de absorção.

Essa especificação foi realizada de acordo com as dimensões unitárias do coletor visando uma maior área de captação de energia solar e uma redução do número total de coletores selecionados. Desse modo, essa orientação foi fundamentada a partir de uma análise do catálogo técnico do fabricante *Sunflower*, que fornece informações sobre a eficiência e a performance do coletor solar. Abaixo estão as especificações técnicas do coletor selecionado.

Tabela 13 – Dados do coletor solar do tipo evacuado SFB305818

| <b>Coletor solar</b>                      |                     |
|---|---------------------|
| Material dos tubos                        | Vidro Borossilicato |
| Comprimento dos tubos (mm)                | 1800                |
| Quantidade de tubos (un)                  | 30                  |
| Eficiência térmica (%)                    | 71,3%               |
| Área efetiva do coletor (m <sup>2</sup> ) | 3,78                |

Fonte: Sunflower (2024).

Com base na Tabela 13, verificam-se os dados do coletor solar do tipo evacuado a partir do catálogo do fabricante *Sunflower*, como o material, o comprimento dos tubos, quantidade de tubos, eficiência térmica e área efetiva. Essas informações são relevantes para o dimensionamento do quantitativo de coletores que serão necessários para o acionamento do *chiller* por absorção. Nesse sentido, os coletores solares são responsáveis por captar a radiação solar e transformá-la em energia útil. A radiação solar é considerada dependente da localização geográfica da instalação.

Nesta pesquisa, a descrição do coletor solar do tipo evacuado juntamente com a irradiação global horizontal média da cidade de São Luís-MA pode impactar diretamente a eficiência na captação de energia solar, uma vez que essa cidade apresenta uma irradiação global horizontal anual de aproximadamente 5,44 kWh/(m<sup>2</sup>.dia) com inclinação de 2° a Norte, conforme os dados do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), o que evidencia o seu potencial significativo para a captação de energia solar.

Ao levar em conta a taxa de irradiação solar de São Luís ao longo de um ano, verifica-se a necessidade de apresentar a simulação energética para o *chiller* de absorção com o intuito de estimar a quantidade média de calor gerada para o acionamento de um *chiller* por absorção de vapor.

Diante do potencial de captação de energia solar da cidade de São Luís, a Tabela 14 apresenta a simulação energética para a indicação proposta do modelo *Carrier 16LJ*.

Tabela 14 – Simulação energética para o *chiller* por absorção

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Potência Ar-Condicionado                                   | 88 kW                   |
| Energia térmica de acionamento                             | 112,82                  |
| Energia anual requerida pelo <i>chiller</i>                | 246.093,8 kWh           |
| Energia gerada pelos coletores                             | 270.692,2 Kwh           |
| Quantidade de coletores                                    | 47                      |
| Área dos coletores solares necessária                      | 174,5 m <sup>2</sup>    |
| Quantidade de área por energia gerada (m <sup>2</sup> /kW) | 1,98 m <sup>2</sup> /kW |
| Volume de armazenamento de energia (m <sup>3</sup> )       | 9,64 m <sup>3</sup>     |

Fonte: Elaboração própria (2024).

Nesse entendimento, a simulação energética para o *chiller* por absorção aplicada a UTI para o período de doze meses pode ter um potencial de geração de energia térmica pelos coletores (anual) de 270.692,2 kWh, que foi considerada superior à energia requerida pelo *chiller* de 246.093,80 kWh/ano. Assim, deve-se destacar que a energia anual requerida pelo *chiller* corresponde à quantidade de calor que deve ser gerado ao longo de um ano pelos coletores solares.

Nesta pesquisa, para atender a demanda energética de acionamento do *chiller* por absorção, faz-se necessário o uso de 47 coletores solares para uma área de 174,5 m<sup>2</sup>. Isso resultou em uma área por unidade de potência gerada de 1,98 m<sup>2</sup>/kW de área. Além disso, especificou-se um volume de armazenamento de energia de 9,64 m<sup>3</sup>, permitindo que o *chiller* possa operar de forma eficiente, mesmo em condições de demanda variável da UTI e durante os períodos de menor irradiância.

A instalação de 47 coletores solares é considerada viável, tendo em vista a disponibilidade da área de cobertura da UTI, que ultrapassa 300 m<sup>2</sup>. Desse modo, o sistema de climatização pode ser ampliado posteriormente, uma vez que a demanda de carga térmica do edifício pode sofrer alterações.

O sistema de climatização de ar-condicionado sustentável de *chiller* por absorção proposto para o HUUFMA, obteve uma simulação energética de resultado similar aos estudos da área de refrigeração solar, como os achados de Rosiek e Batlles (2009), que simularam um sistema de climatização por meio de um *chiller* por absorção H<sub>2</sub>O–LiBr.

No que diz respeito à potência de ar-condicionado a partir da simulação energética para o *chiller* por absorção, Rosiek e Batlles (2009) investigaram o desempenho de um sistema de climatização assistido por energia solar, instalado no Centro de Pesquisa em Energia Solar (CIESOL) da Universidade de Almeria, na Espanha. O sistema consistia em um *chiller* de absorção H<sub>2</sub>O–LiBr, com a potência de climatização de 70 kW e 160 m<sup>2</sup> de coletor solar. Os resultados demonstraram que

os coletores solares eram capazes de fornecer uma energia suficiente para o *chiller* de absorção, atendendo de forma adequada às demandas de resfriamento e aquecimento durante o verão e o inverno, respectivamente.

Tratando-se ainda da área por energia gerada ( $\text{m}^2/\text{kW}$ ), verificou-se uma concentração de área por energia de magnitude de  $1,98 \text{ m}^2/\text{kW}$  de calor gerado nesta pesquisa, dado que foi considerado semelhante aos estudos de Liu, Ye e Liu (2014), que descreveram um sistema de resfriamento por absorção LiBr/ $\text{H}_2\text{O}$ , com uma capacidade de resfriamento de 20 kW e uma área de coletor de  $27 \text{ m}^2$ , o que representou  $1,35 \text{ m}^2/\text{kW}$  de quantidade de área por energia gerada sem armazenamento térmico.

Nesta pesquisa, acerca do armazenamento térmico, a proposta para a UTI inclui o dimensionamento de um tanque de armazenamento de volume  $9,6 \text{ m}^3$  (9.600 litros) para garantir o fornecimento adequado de água a uma temperatura entre 70 e 80 °C. Nessa proposta, o uso do tanque foi indicado para esse sistema de climatização, uma vez que pode ser considerado uma estratégia para operar em uma demanda de regime tarifário elevado. Além disso, deve-se considerar que o tanque de armazenamento indicado possui uma disponibilidade para operar em um período de até 6 horas.

Ao indicar um tanque de armazenamento para um sistema de ar-condicionado, deve-se considerar o fator de limitação da energia solar durante o dia, uma vez que isso reflete no armazenamento de calor. Em conformidade com o uso de tanque de armazenamento, os achados de Ibrahim *et al.* (2024) apresentaram que o armazenamento de energia solar é considerado necessário para um sistema de climatização sustentável, pois foi identificada uma limitação de energia solar no estudo, tendo em vista a sua disponibilidade não contínua.

Para a proposta do sistema de climatização de *chiller* por absorção, estimou-se um cenário simulado com funcionamento de 6 horas diárias, esse período condiz com a capacidade instalada para o tanque de armazenamento, conforme descrito anteriormente. Esse período das 6 horas de armazenamento justifica-se também em decorrência da alta disponibilidade de irradiação solar em São Luís, permitindo que o sistema utilize a energia solar durante os períodos em que a geração é considerada máxima.

Dessa maneira, a alta disponibilidade de sol durante o ano pode favorecer a viabilidade de um sistema de climatização de ar-condicionado de *chiller* por absorção,

considerando que a cidade de São Luís apresenta uma irradiação solar média superior a 2.000 kWh/m<sup>2</sup>. Esse aproveitamento pode ser benéfico para o contexto da UTI, uma vez que esse ambiente requer uma economia de custos, flexibilidade operacional.

A literatura destaca o uso de *chillers* por absorção como uma solução viável para o resfriamento, como o estudo de Aljuhani e Dayem (2024), que incluiu a aplicação de um resfriador de absorção solar em uma tenda hipoteticamente localizada na zona de Mina, na Arábia Saudita, onde milhões de peregrinos se reúnem anualmente. Além disso, Rossetti, Paci e Alimonti (2017) também abordaram contextos semelhantes, que exploraram a eficácia e as vantagens dos sistemas de resfriamento por absorção em diversas aplicações.

No entanto, existem limitações que devem ser consideradas em relação à proposta do sistema de climatização do *chiller* por absorção, como a oscilação da geração de energia solar, principalmente em dias nublados ou chuvosos, o que pode levar a uma demanda excessiva dos sistemas de armazenamento. Além disso, o sistema de *chiller* por absorção pode apresentar um custo de instalação elevado e uma necessidade de manutenção dos coletores solares, bem como a necessidade de um sistema de *backup* para períodos de alta demanda.

Diversos estudos apontam limitações na aplicação do sistema de refrigeração por absorção solar. O elevado custo dos *chillers* de absorção, a ausência de padronização, a falta de conhecimento do mercado e a compatibilidade com projetos de construção são apontados como barreiras para o desenvolvimento dessa tecnologia (Soni *et al.*, 2023). A eficiência dos sistemas pode ser afetada por fatores climáticos e pela fração solar anual que pode influenciar diretamente o COP (Agrouaz *et al.*, 2017). Em regiões com uma fração solar menor, a viabilidade térmica pode ser comprometida (Agrouaz *et al.*, 2017) e o dimensionamento adequado do tanque de armazenamento térmico é considerada relevante para o seu desempenho (Bellos; Tzivanidis, 2017; Rosiek; Batlles, 2009).

A proposta do sistema de climatização *chiller* por absorção pode ser implementada em conjunto com alternativas que visem mitigar a redução de custos por parte da UTI. No entanto, diante das especificidades dessa alternativa, faz-se necessário comparar a viabilidade das duas propostas mencionadas nesta pesquisa.

### 6.5.3 Comparativo entre o *Chiller* de Absorção e Compressão de Vapor

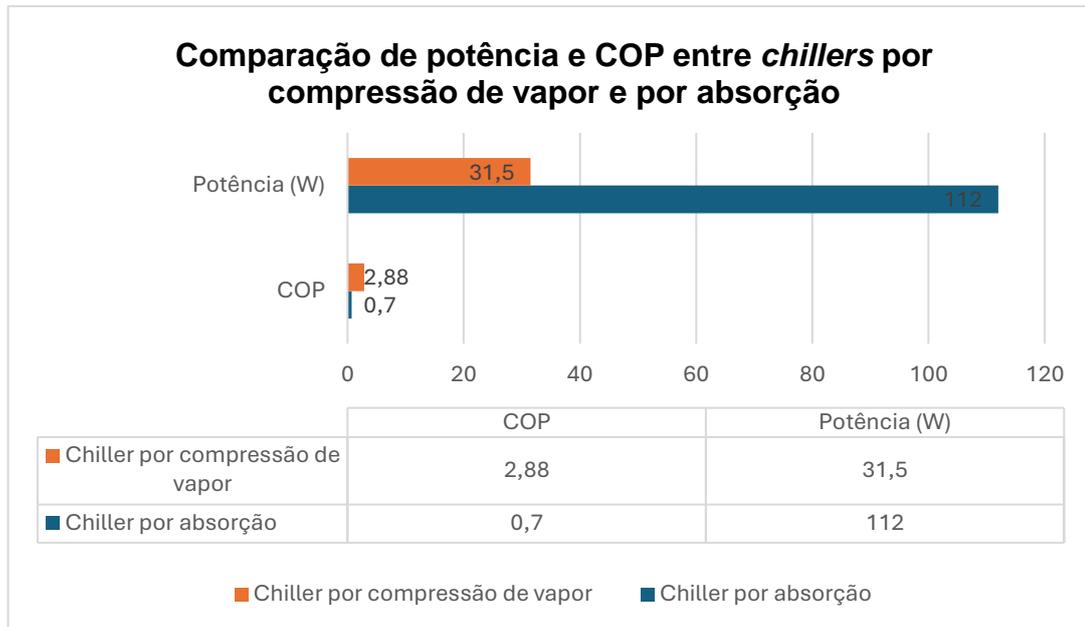
Ao comparar os sistemas de climatização por absorção e de compressão de vapor que podem ser aplicados para o âmbito hospitalar de uma UTI, os resultados das simulações energéticas para cada sistema indicam que os *chillers* por compressão de vapor apresentam custos operacionais mensais mais elevados em decorrência da sua significativa demanda energética. Assim, esse aumento mensal considerável nos custos está relacionado ao fato de que esses sistemas de compressão de vapor dependem exclusivamente de energia elétrica, o que pode resultar em despesas consideráveis para a gestão de custos de uma UTI, principalmente durante os períodos de regime tarifário.

Por outro lado, os sistemas de resfriamento de *chiller* por absorção acionados por fonte renovável, como a energia solar, apresentam-se como uma alternativa sustentável e economicamente viável a longo prazo para a UTI. Enquanto vantagem, a abordagem do *chiller* de absorção pode reduzir os custos operacionais e contribuir para a redução dos impactos ambientais, tornando-os uma opção vantajosa para o contexto hospitalar que visa alcançar eficiência energética e sustentável.

Tratando-se da utilização de *chiller* por absorção e a busca por reduzir os impactos ambientais por parte das instituições de saúde, os estudos de Chakravarty *et al.* (2022) consideraram que o *chiller* de absorção é um dos sistemas de climatização mais usados para suprir o resfriamento de média e grande escala. Desse modo, nos últimos anos, os edifícios começaram a usar o *chiller* de absorção de forma mais frequente para atender as demandas de conforto térmico, custo-benefício e flexibilidade da fonte de acionamento.

Nesse sentido, considera-se que o *chiller* de compressão de vapor acionado por rede elétrica e que utiliza fluidos refrigerantes derivados de combustíveis fósseis apresenta um impacto ambiental potencial em relação ao *chiller* de absorção (Rizkalla, 2024).

Ao comparar a simulação energética do sistema de climatização por absorção e de compressão de vapor, os resultados obtidos nesta pesquisa demonstraram que para o contexto da UTI, o sistema de compressão de vapor requer 31,85 kW de energia elétrica para a sua operação, enquanto o sistema de absorção demanda 112,82 kW. A Figura 18 apresenta esses dados, mostrando a diferença de potência e o COP para cada sistema.

Figura 18 – Comparação de potência e COP entre os dois *chillers*

Fonte: Elaboração própria (2024).

Nesta pesquisa, utilizou-se um COP de 0,70 para o *chiller* de absorção e de 2,88 para o *chiller* de compressão de vapor, dados obtidos por meio dos catálogos técnicos de cada fabricante de *chiller*, *Carrier* e *Trane*, respectivamente. Assim sendo, verificou-se uma maior eficiência energética dos sistemas de compressão de vapor, uma vez que eles possuem uma maior capacidade de transformação de energia.

Ao avaliar o COP dos dois sistemas de climatização, percebe-se que o COP do *chiller* de compressão de vapor (2,88) é superior ao *chiller* por absorção (0,70). Logo, o *chiller* de compressão de vapor apresentou uma eficiência energética superior em termos de transformação de energia.

O COP corresponde a um parâmetro para avaliar e comparar a eficiência energética de um sistema de climatização e refrigeração, sendo sua avaliação importante para a redução dos custos operacionais. A título de exemplo, os estudos de Otanicar, Taylor e Phelan (2012) identificaram um COP entre 0,76 e 0,86 para os sistemas de resfriamento por absorção; e entre 3 e 6 para os *chillers* de compressão de vapor. Logo, esses dados demonstraram uma maior eficiência para os *chillers* de compressão de vapor.

Ao comparar os custos operacionais obtidos entre os dois sistemas de climatização propostos, observou-se uma diferença significativa em relação as despesas mensais de consumo energético, uma vez que o *chiller* de compressão de

vapor, que demanda 732,96 kWh/diário da rede elétrica, implica em um custo considerável para a UTI, principalmente em um contexto de regime tarifário de ponta. Assim, esse cenário de pico energético pode aumentar os custos de operação da UTI, o que impacta o planejamento orçamentário para a instituição.

Ao avaliar os custos operacionais do *chiller* por absorção, destaca-se que, para esta pesquisa, esse equipamento foi inserido em paralelo com um armazenamento térmico, que opera por 6 horas diárias. Nesta pesquisa, para a cidade de São Luís, adotou-se a irradiação solar entre o período das 11h às 17h, tendo em vista que nesse período ocorre o pico da carga de resfriamento do sistema de climatização.

O *chiller* de absorção possui um sistema de armazenamento térmico que corresponde às 6 horas descritas. Nesse entendimento, o funcionamento do seu armazenamento térmico do *chiller* (6 horas) pode ser distribuído com base no regime tarifário de ponta da concessionária pública de energia da cidade de São Luís, que segundo a Equatorial Energia, ocorre entre as 18:00 às 20:59, o que totaliza um consumo energético de 3 horas diárias.

A estratégia de utilizar 3 horas de reserva diária do *chiller* para o consumo durante o horário de ponta (18:00 às 20:59) da concessionária pública pode beneficiar a gestão dos custos da UTI. No entanto, ao considerar que o funcionamento do seu armazenamento térmico do *chiller* (6 horas), se for empregado 3 horas de reserva para o horário de tarifa de ponta, verifica-se a presença de um outro armazenamento térmico de 3 horas (50%), que também pode ser utilizada em outro momento, como o período noturno após às 20:59 e de intermitência solar, por exemplo.

Os autores Ibrahim *et al.* (2024) consideram que o armazenamento da reserva técnica de energia é uma estratégia relevante, uma vez que permite o armazenamento de energia térmica gerada durante as horas de pico de luz solar, possibilitando seu uso posterior, quando a luz solar não está disponível.

Nesse sentido, a partir dos dados da simulação energética, verificou-se que o sistema de *chiller* por absorção consome 528 kWh de energia térmica diária. No entanto, com a utilização da estratégia do uso da reserva técnica para o seu consumo diário mais elevado da tarifa de ponta, a economia de energia é considerada significativa, reduzindo o custo para valores muito próximos a zero.

Tratando-se de economia de energia em face de acionamento térmico, o estudo de Calise (2012) apontou que, em Nápoles, pode-se alcançar uma economia de energia de 94% ao ano no acionamento de um *chiller* de absorção para uma área de

coletor de 800 m<sup>2</sup>. Essa economia substancial resultou da integração eficiente da energia solar térmica com o sistema de climatização, o que reduz consideravelmente a demanda elétrica.

Nesse sentido, a proposta do *chiller* por absorção para a UTI é considerada relevante, principalmente considerando que esse sistema pode operar com uma reserva técnica de tanque de armazenamento de 6 horas contínuas. Essa reserva permite que a energia armazenada seja utilizada durante períodos de tarifação de ponta, em que as tarifas elétricas são significativamente mais altas, podendo ser até 7 vezes maior do que as tarifas em horários fora de pico.

Dessa forma, a utilização do *chiller* por absorção para a UTI pode reduzir os custos operacionais e oferecer a disponibilidade do uso de um tanque de armazenamento enquanto reserva técnica, que pode mitigar despesas mais elevadas associadas ao consumo de energia elétrica em horários de maior demanda.

De acordo com Khan, Saidur e Al-Sulaiman (2017), o armazenamento de energia se tornou componente relevante em sistemas de tecnologia de energia renovável, como o *chiller* de absorção. Desse modo, os sistemas solares térmicos utilizam a maior parte da energia térmica armazenada a partir da irradiação solar para uso posterior.

Os estudos de Bellos e Tzivanidis (2017), ressaltaram a importância da implementação de estratégias para minimizar esses custos, como a instalação de tanques de armazenamento. Além disso, os autores destacaram que o *chiller* de absorção corresponde a uma solução economicamente viável em regiões com alta incidência solar.

Os dados de consumo energético dos sistemas de climatização propostos nesta pesquisa (*chiller* por absorção e compressão de vapor) devem ser avaliados individualmente por parte da gestão da UTI, uma vez que têm um impacto econômico significativo para o consumo energético mensal da instituição.

Ainda acerca dos estudos de Bellos e Tzivanidis (2017), os autores ressaltaram a viabilidade econômica e a eficiência energética dos sistemas de resfriamento por absorção e destacaram a necessidade de considerar o espaço físico necessário para a instalação dos coletores solares em edifícios.

Além do desempenho energético, outro fator crítico a ser considerado é o espaço físico necessário para a instalação dos coletores solares para o *chiller* de absorção. Logo, nesta pesquisa, a proposta simulada para a UTI contemplou o

dimensionamento de coletores solares do tipo evacuado, que são conhecidos por sua eficiência na captação de energia solar, principalmente em condições climáticas adversas. Essa análise resultou em uma área requerida de 174,5 m<sup>2</sup> para esses coletores. Assim, esse dimensionamento evidenciou a necessidade de um espaço físico apropriado, principalmente em áreas urbanas, onde a disponibilidade é considerada limitada.

No entanto, para o sistema de *chiller* por absorção, o dimensionamento de coletores solares apresenta uma limitação em decorrência das áreas dos edifícios com espaços de telhados limitados. Nessa perspectiva, Shirazi *et al.* (2018) destacaram que a principal desvantagem dos *chillers* acionados por energia solar corresponde ao seu baixo COP, que requer a necessidade de grandes áreas de coletores solares, o que encarece a sua instalação. Isso se torna um desafio para os edifícios com espaço de telhado limitado.

Enquanto os *chillers* de compressão de vapor, apesar de exigirem uma quantidade considerável de energia elétrica, apresentam custos operacionais mais elevados, demandam um espaço físico menor para a sua instalação, uma vez que não dependem de coletores solares e podem ser conectados diretamente à rede elétrica.

Ao comparar os sistemas de climatização por absorção e compressão de vapor, cada sistema um apresenta as suas vantagens e desvantagens, que podem impactar a operação e os custos de uma UTI. Desse modo, o *chiller* por absorção é considerado uma alternativa sustentável com acionamento de energia solar, permite a redução dos custos operacionais e contribui para mitigar o impacto ambiental. Além disso, a sua capacidade de armazenar energia térmica possibilita o uso da reserva em horários de tarifa elevada, o que resulta em um custo para valores muito próximos a zero.

Nesse entendimento, considera-se que a implementação de um sistema de climatização de *chiller* por absorção pode apresentar um impacto ambiental positivo, uma vez que a energia produzida pelos coletores solares representa uma redução de 9,47 toneladas de CO<sub>2</sub> considerando os dados disponibilizados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2023), que identificou um fator médio anual de 0,0385 toneladas de CO<sub>2</sub> por megawatt-hora (tCO<sub>2</sub>/MWh) para 2023. Isso significa que o *chiller* por absorção possui como impacto a diminuição de CO<sub>2</sub> na atmosfera, o que representa uma redução na emissão de gases de efeito estufa.

Por outro lado, o *chiller* de compressão de vapor, embora dependa de energia elétrica, possui um COP superior, oferece uma maior eficiência energética e

desempenho em alta demanda, embora possa implicar em custos operacionais mais elevados. Portanto, a escolha entre os dois sistemas depende de diversos fatores, como a análise entre a sustentabilidade do *chiller* de absorção e a eficiência energética do *chiller* de compressão de vapor.

## 7 CONCLUSÃO

Os sistemas de climatização desempenham um papel relevante no conforto térmico e na qualidade do ar em ambientes hospitalares, o que impacta diretamente a saúde e a recuperação dos pacientes. Esta pesquisa teve como objetivo investigar a viabilidade de implementação de um sistema de climatização sustentável, baseado em energia renovável, para a UTI do HUUFMA, em comparação com um sistema convencional de compressão de vapor.

O estudo comparativo entre os dois sistemas mostrou que o *chiller* por absorção, apesar do custo inicial mais elevado na sua implementação, demonstrou-se mais viável economicamente a longo prazo, com menores custos operacionais, impacto ambiental reduzido e uso de fontes renováveis.

No entanto, o sistema de compressão de vapor apresentou uma maior eficiência energética, que depende da rede elétrica, o que pode resultar em custos mensais elevados de energia elétrica, além de gerar um maior impacto ambiental.

Ao considerar a sua viabilidade técnica e econômica, o *chiller* por absorção apresentou-se como uma alternativa vantajosa para a UTI estudada, mas deve estar alinhado com as políticas públicas de sustentabilidade. Com a implementação do sistema de climatização para a UTI, recomenda-se a operação do *chiller* por absorção em conjunto com o *chiller* de compressão de vapor. O sistema sustentável a ser utilizado durante o dia, de modo a aproveitar a energia solar, enquanto o da rede elétrica durante os períodos de menor regime tarifário, com foco em reduzir o consumo energético e os custos operacionais.

Portanto, esta pesquisa enfatiza a necessidade de inserção de políticas públicas que incentivem a adoção de tecnologias sustentáveis, como os *chillers* por absorção, e que promovam o desenvolvimento de soluções energéticas renováveis, com o objetivo de tornar as instalações hospitalares mais eficientes e sustentáveis.

A implementação do *chiller* por absorção em ambientes de UTI pode ser considerada uma alternativa eficaz e sustentável, que oferece benefícios econômicos e ambientais, além de otimizar a gestão de custos e promover a eficiência energética. Assim, sugere-se que pesquisas aplicadas sejam desenvolvidas no campo da climatização para ambientes hospitalares, de modo a avaliar a redução dos custos operacionais, a viabilidade e as políticas públicas necessárias para o funcionamento ideal desses sistemas.

## REFERÊNCIAS

- ABED, A. M. *et al.* Enhancement aspects of single stage absorption cooling cycle: a detailed review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 1010-1045, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-1 – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projeto das instalações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-2 – Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7256 - Tratamento de ar em estabelecimentos assistenciais de saúde (EAS) – Requisitos para projeto e execução das instalações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ABREU, R. P. *et al.* Thermoeconomic and thermoenvironmental analysis of the chilled water system in a shopping mall. **International Journal of Refrigeration**, v. 134, p. 304-311, 2022.
- ABU-ZEID, M. A. *et al.* Performance enhancement of flat-plate and parabolic trough solar collector using nanofluid for water heating application. **Results in Engineering**, v. 21, p. 101673, 2024.
- ADDY, M. N.; ADINYIRA, E.; AYARKWA, J. Identifying and weighting indicators of building energy efficiency assessment in Ghana. **Energy Procedia**, v. 134, p. 161-170, 2017.
- AGROUAZ, Y. *et al.* Energy and parametric analysis of solar absorption cooling systems in various Moroccan climates. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 9, p. 28-39, 2017.
- ALHUYI-NAZARI, M. *et al.* Applications of geothermal sources for absorption chillers as efficient and clean cooling technologies for buildings: A comprehensive review. **Journal of Building Engineering**, p. 108340, 2023.
- ALJUHANI, Y.; DAYEM, A. Thermal analysis of a solar-powered absorption air-conditioning system: case study for a tent in Mina zone, Saudi Arabia. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, p. 100472, 2022.
- ALSAGRI, A.; ALROBAIAN, A. A.; ALMOHAIMEED, S. A. Concentrating solar collectors in absorption and adsorption cooling cycles: An overview. **Energy Conversion and Management**, v. 223, p. 113420, 2020.
- AL-UGLA, A. A.; EL-SHAARAWI, M. A. I.; SAID, S. A. M. Alternative designs for a 24-hours operating solar-powered LiBr–water absorption air-conditioning technology. **International Journal of Refrigeration**, v. 53, p. 90-100, 2015.

AL-YASIRI, Q.; SZABÓ, M.; ARICI, M. A review on solar-powered cooling and air-conditioning systems for building applications. **Energy Reports**, v. 8, p. 2888-2907, 2022.

AMARIS, C.; VALLÈS, M.; BOUROUIS, M. Vapour absorption enhancement using passive techniques for absorption cooling/heating technologies: A review. **Applied energy**, v. 231, p. 826-853, 2018.

ARABKOOHSAR, A.; SADI, M. Technical comparison of different solar-powered absorption chiller designs for co-supply of heat and cold networks. **Energy Conversion and Management**, v. 206, p. 112343, 2020.

ASHRAE. ANSI/ASHRAE 55-2023. **Thermal environmental conditions for human occupancy**. 2024. Disponível em: <https://blog.ansi.org/ansi-ashrae-55-2023-thermal-environmental-conditions/#:~:text=About%20ANSI%2FASHRAE%2055%2D2023&text=Specifically%2C%20it%20covers%20thermal%20environmental,not%20less%20than%2015%20minutes>. Acesso em: 12 jan. 2025.

ASSILZADEH, F. *et al.* Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors. **Renewable energy**, v. 30, n. 8, p. 1143-1159, 2005.

BAO, Y. *et al.* Novel working fluid pair of methanol/betaine-urea for absorption refrigeration system driven by low-temperature heat sources. **Energy**, v. 298, p. 131223, 2024.

BARLEV, D.; VIDU, R.; STROEVE, P. Innovation in concentrated solar power. **Solar energy materials and solar cells**, v. 95, n. 10, p. 2703-2725, 2011.

BELLOS, E. *et al.* Energetic, exergetic and financial evaluation of a solar driven absorption chiller– A dynamic approach. **Energy Conversion and Management**, v. 137, p. 34-48, 2017.

BELLOS, E.; TZIVANIDIS, C. Energetic and financial analysis of solar cooling systems with single effect absorption chiller in various climates. **Applied Thermal Engineering**, v. 126, p. 809-821, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução-RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003**. Aprova a regulamentação técnica sobre a propaganda, publicidade e informação de produtos sujeitos à vigilância sanitária. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 16 jan. 2003.

CALCEDO, J. G. S.; NEVES, N. S.; FERNANDES, J. P. A. Measurement of embodied carbon and energy of HVAC facilities in healthcare centers. **Journal of cleaner production**, v. 289, p. 125151, 2021.

CALISE, F. High temperature solar heating and cooling systems for different Mediterranean climates: Dynamic simulation and economic assessment. **Applied Thermal Engineering**, v. 32, p. 108-124, 2012.

CALISE, F. Thermoeconomic analysis and optimization of high efficiency solar heating and cooling systems for different Italian school buildings and climates. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 7, p. 992-1003, 2010.

CARLESSO, C. L.; DUTRA, E. J. B.; ROSA, J. S. Desenvolvimento de uma bancada didática de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor. **Revista Liberato**, v. 21, n. 36, p. 131-142, 2020.

CARRIER. **Chiller de absorção de efeito simples a água quente**. 2024. Disponível em: <https://www.carrier.com/commercial/pt/pt/produtos/ar-condicionado/chillers-de-absorcao/16lj-16lj-f/>. Acesso em: 12 jan. 2025.

CERTIFICAÇÃO LEED. **Conheça a certificação LEED**. 2024. Disponível em: <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacao/certificacao-leed>. Acesso em: 11 jan. 2025.

CHAKRAVARTY, K. H. *et al.* A review on integration of renewable energy processes in vapor absorption chiller for sustainable cooling. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 50, p. 101822, 2022.

CHEN, Z. *et al.* Energy consumption prediction of cold source system based on graphsage. **IFAC-PapersOnLine**, v. 54, n. 11, p. 37-42, 2021.

COOLX ENERGY. **Commercial JC**. 2017. Disponível em: <https://www.coolxenergy.com/wp-content/uploads/2017/06/Commercial-JC-Pisani.jpg>. Acesso em: 20 jan. 2025.

COSTA, E. C. **Refrigeração**. 3. ed. 10. reimpressão. São Paulo: Blucher, 2013.

DAUD, A. K. M. *et al.* Expertise-based systematic guidelines for chiller retrofitting in healthcare facilities. **Journal of Building Engineering**, v. 74, p. 106708, 2023.

ELDIARIO. **¿Qué es un colector solar térmico y cuánto cuesta instalar uno?** 2023. Disponível em: [https://www.eldiario.es/consumoclaro/que-es-un-colector-solar-termico-y-cuanto-cuesta-instalar-uno\\_1\\_10051687.html](https://www.eldiario.es/consumoclaro/que-es-un-colector-solar-termico-y-cuanto-cuesta-instalar-uno_1_10051687.html). Acesso em: 11 nov. 2024.

ELDOMINVES. **Solar**. 2024. Disponível em: [https://eldominvest.com/media/cache/d5/0a/thumb11\\_solar1.png](https://eldominvest.com/media/cache/d5/0a/thumb11_solar1.png). Acesso em: 21 jan. 2025.

EPE. Empresa de pesquisa energética. **Relatório síntese 2023**. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN\\_S%C3%ADntese\\_2023\\_PT.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf). Acesso em: 21 jan. 2025.

EPE. Empresa de pesquisa energética. **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**, 2012.

EPE. **Relatório Síntese ano base 2015**. 2016. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados->

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-92/Relat%C3%B3rio\_S%C3%ADntese\_2016.pdf. Acesso em: 10 jan. 2025.

EQUATORIAL DE ENERGIA. **Valor de tarifas e serviços**. 2024. Disponível em: <https://ma.equatorialenergia.com.br/informacoes-gerais/valor-de-tarifas-e-servicos/#tarifas-grupo-a>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FAN, Y.; LUO, L.; SOUYRI, B. Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 11, n. 8, p. 1758-1775, 2007.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**: arquitetura, urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. **Edifício ambiental**. 1. ed. Oficina de Textos: São Paulo, 2015.

GOYAL, P. *et al.* Adsorption refrigeration technology—An overview of theory and its solar energy applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1389-1410, 2016.

HARISH, V. S. K. V.; KUMAR, Arun. A review on modeling and simulation of building energy systems. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 56, p. 1272-1292, 2016.

HASAN, A. A *et al.* A review of solar thermal cooling technologies in selected Middle East and North African countries. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, p. 102871, 2022.

HIRANO, Y. *et al.* Simulation of urban surface temperature and surface heat balance in the Tokyo metropolitan area. **Sustainable Cities and Society**, p. 105596, 2024.

IBRAHIM, N. I. *et al.* Solar cooling with absorption chillers, thermal energy storage, and control strategies: A review. **Journal of Energy Storage**, v. 97, p. 112762, 2024.

IEA. **World energy outlook**. 2018. Disponível em: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/77ecf96c-5f4b-4d0d-9d93-d81b938217cb/World\\_Energy\\_Outlook\\_2018.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/77ecf96c-5f4b-4d0d-9d93-d81b938217cb/World_Energy_Outlook_2018.pdf). Acesso em: 20 jan. 2025.

INPE. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

IPCC. **Climate change 2023**. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf). Acesso em: 10 nov. 2024.

IRENA, **Renewable power generation costs in 2020**, international renewable energy agency, Abu Dhabi, 2021. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>. Acesso em: 10 nov. 2024.

JADHAV, A.; RAUT, D.; KALAMKAR, V. R. Design and experimental analysis of a shell and tube vapor generator for solar thermal vapor absorption refrigeration. **Applied Thermal Engineering**, v. 230, p. 120694, 2023.

JEONG, Y.; KIM, D. Analysis of the necessity of revising the building energy efficiency certificate for non-residential buildings in South Korea. **Journal of Building Engineering**, p. 109811, 2024.

JIA, Z. *et al.* A robust capacity configuration selection method of multiple-chiller system concerned with the uncertainty of annual hourly load profile. **Energy**, v. 282, p. 129000, 2023.

KARAMI, M.; JALALIZADEH, M. Performance comparison and risk assessment of BIPVT-based trigeneration systems using vapor compression and absorption chillers. **Journal of Building Engineering**, v. 69, p. 106244, 2023.

KHAN, M. M. A.; SAIDUR, R.; AL-SULAIMAN, F. A. A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 76, p. 105-137, 2017.

KHAN, N.; KUMAR, D.; KUMAR, P. Silver nanoparticles embedded guar gum/gelatin nanocomposite: green synthesis, characterization and antibacterial activity. **Colloid and Interface Science Communications**, v. 35, p. 100242, 2020.

KHAN, R.; KUMAR, R.; ROHATGI, N. **Sustainable Air-Conditioning**. 2020.

KIM, D.; FERREIRA, I. Solar refrigeration options—a state-of-the-art review. **International Journal of refrigeration**, v. 31, n. 1, p. 3-15, 2008.

KUMAR, K. R.; CHAITANYA, N. K.; KUMAR, N. S. Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation – **A review**. *Journal of Cleaner Production*, v. 282, p. 125296, 2021.

LI, Z.; YE, X.; LIU, J. Performance analysis of solar air cooled double effect LiBr/H<sub>2</sub>O absorption cooling system in subtropical city. **Energy Conversion and Management**, v. 85, p. 302-312, 2014.

LIN, L. *et al.* Flexible regulation of airport air-conditioning systems: Impact of cooling load variations on temperature stability. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111324, 2024.

MADHLOPA, A. **Solar receivers for thermal power generation: fundamentals and advanced concepts**. Academic Press, 2022.

MAHMOUDI, N. *et al.* Environmental sustainability in hospitals: Dual analysis of electrical consumption and pollutant emissions. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 19, p. 100740, 2024.

MARTÍNEZ, C. I. P.; POVEDA, A. C. Challenges and opportunities in the management of refrigeration and air conditioning systems to reduce environmental

impacts in the Colombian health sector. **International Journal of Refrigeration**, v. 141, p. 54-65, 2022.

MARTINS, M. J. **Energia solar fotovoltaica: história, tecnologias, mercado e aplicações**. São Paulo: Érica, 2021.

MARUGÁN-CRUZ, C. *et al.* District cooling network connected to a solar power tower. **Applied Thermal Engineering**, v. 79, p. 174-183, 2015.

MATOS, R. S. **Climatização**. 2017. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC153/Apostila/Apostila%20Climatiza%e7%e3o.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2025.

MENDIBURU, A. Z. *et al.* Thermodynamic modelling for absorption refrigeration cycles powered by solar energy and a case study for Porto Alegre, Brazil. **Energy**, v. 266, p. 126457, 2023.

MORAN, M. J. *et al.* **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

MUSLIM, S. A. EnergyPlus-Towards the selection of right simulation tool for building energy and power systems research. **Journal of Energy and Power Technology**, v. 3, n. 3, p. 1-9, 2021.

NARAYANAN, R.; HARILAL, G. K.; GOLDBER, S. Feasibility study on the solar absorption cooling system for a residential complex in the Australian subtropical region, **Case Stud. Therm. Eng.** 27, 2021.

NAZARI, M. A. *et al.* Applications of geothermal sources for absorption chillers as efficient and clean cooling technologies for buildings: A comprehensive review. **Journal of Building Engineering**, p. 108340, 2023.

OH, S. J. *et al.* Approaches to energy efficiency in air conditioning: A comparative study on purge configurations for indirect evaporative cooling. **Energy**, v. 168, p. 505-515, 2019.

OLIVEIRA, K. B. *et al.* Guidelines for efficient and sustainable energy management in hospital buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, p. 129644, 2021.

OTANICAR, T.; TAYLOR, R. A.; PHELAN, P. E. Prospects for solar cooling—An economic and environmental assessment. **Solar energy**, v. 86, n. 5, p. 1287-1299, 2012.

PACHAIVANNAN, P.; MANIMUTHU, S.; JEGADEESAN, V. Comparative energy performance analysis of solar water pumping systems across diverse climate zones. **Journal of Engineering Research**, 2024.

PAULA, C. H. *et al.* Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as

alternatives to replace R134a. **International Journal of Refrigeration**, v. 113, p. 10-20.

PINTALDI, S. *et al.* A review of thermal energy storage technologies and control approaches for solar cooling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 975-995, 2015.

PRIETO, A. *et al.* Coolfacade: State-of-the-art review and evaluation of solar cooling technologies on their potential for façade integration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 395-414, 2019.

RAHMAN, S.; SAID, Z.; ISSA, S. Performance evaluation and life cycle analysis of new solar thermal absorption air conditioning system. **Energy Reports**, v. 6, p. 673-679, 2020.

RAJENDRAN, D. R. *et al.* Review on influencing parameters in the performance of concentrated solar power collector based on materials, heat transfer fluids and design. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 140, p. 33-51, 2020.

REBELO, F. W. D. *et al.* Experimental investigation of a photovoltaic solar air conditioning system and comparison with conventional unit in the context of the state of Piauí, Brazil. **Solar Energy**, v. 272, p. 112492, 2024.

REFRIGERAÇÃO PARA TODOS. **Ciclo de refrigeração e transferência de calor**. 2016. Disponível em: <https://refrigeracaoparatodos.blogspot.com/2016/10/ciclo-de-refrigeracao-e-transferencia.html>. Acesso em: 20 jan. 2025.

RELATÓRIO HVAC SERVICES MARKET. **Hvac services market (2024 - 2029)**. 2023. Disponível em: <https://www.technavio.com/report/hvac-market-industry-analysis#:~:text=The%20HVAC%20market%20size%20is,building%20automation%20and%20control%20systems>. Acesso em: 22 jan. 2025.

RENEWABLE POWER NEWS. **DII GmbH, a radical emerge and initiative for sustainable solar energy**. 2009. Disponível em: <http://www.renewablepowernews.com/archives/422>. Acesso em: set. 2024.

REY-HERNÁNDEZ, J. M. *et al.* Innovative exergy indicators for analyzing an nZEB building to promote new areas of improvement. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 69, p. 103917, 2024.

RIZKALLA, M. M. M. **Feasibility study of managing peak cooling loads to achieve energy cost reduction in a northern climate campus**. 2024. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica), 2024.

RODRÍGUEZ-TOSCANO, A. *et al.* Technical, environmental, and economic evaluation of a solar/gas driven absorption chiller for shopping malls in the Caribbean region of Colombia. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 30, p. 101743, 2022.

ROSIEK, S.; BATLLES, F. J. Integration of the solar thermal energy in the construction: Analysis of the solar-assisted air-conditioning system installed in CIESOL building. **Renewable Energy**, v. 34, n. 6, p. 1423-1431, 2009.

ROSSETTI, A.; PACI, E.; ALIMONTI, G. Experimental analysis of the performance of a medium temperature solar cooling plant. **International Journal of Refrigeration**, v. 80, p. 264-273, 2017.

SANTAMOURIS, M. *et al.* Passive and active cooling for the outdoor built environment—Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. **Solar Energy**, v. 154, p. 14-33, 2017.

SARBU, I.; SEBARCHIEVICI, C. Review of solar refrigeration and cooling systems. **Energy and buildings**, v. 67, p. 286-297, 2013.

SCY CHILLER. **O que são sistemas de resfriamento industrial?** 2021. Disponível em: <https://sychiller.com/pt/the-ultimate-guide-to-industrial-chiller>. Acesso em: 14 jan. 2025.

SHARMA, D. K.; SHARMA, D.; ALI, A. H. H. A state of the art on solar-powered vapor absorption cooling systems integrated with thermal energy storage. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 158-189, 2020.

SHIRAZI, A. *et al.* Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review. **Energy conversion and management**, v. 171, p. 59-81, 2018.

SILVA, J. G. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização**. São Paulo: Artliber, 2004.

SILVA, M. T. G. *et al.* **Avaliação experimental do desempenho do R-32 como substituto do R-410A em um sistema de refrigeração**. Trabalho apresentado no 11o Congresso internacional de ar-condicionado, refrigeração, aquecimento e ventilação, 2019.

SOARES, G. F. C. *et al.* Avaliação de desempenho de um sistema de climatização por absorção de vapor utilizando energia solar. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 10, n. 5, p. 43-48, 2016.

SOLAR COLLECTOR. **Collector**. 2024. Disponível em: [https://pt.solarcollector.onosisolar.com/upload/small/Evacuatedtubesolarcollector\\_1\\_0\\_1576462311.jpg](https://pt.solarcollector.onosisolar.com/upload/small/Evacuatedtubesolarcollector_1_0_1576462311.jpg). Acesso em: 20 jan. 2025.

SONI, J. *et al.* Investigative comparison of R134a, R290, R600a and R152a refrigerants in conventional vapor compression refrigeration system. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

SOUZA, A. P. *et al.* Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 277-288, 2011.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: Makron, c1985. 481 p.

SUGAHARA, E. S.; FREITAS, M. R.; CRUZ, V. A. L. **Análise das certificações ambientais de edificações**: aqua, procel, leed e casa azul. *Interação*, Varginha, MG, v. 23, n. 01, p. 12-24, 2021.

SULAIMAN, A. Y. *et al.* A solar powered off-grid air conditioning system with natural refrigerant for residential buildings: A theoretical and experimental evaluation. **Cleaner Energy Systems**, v. 5, p. 100077, 2023.

SUMAN, S.; KHAN, M. K.; PATHAK, M. Performance enhancement of solar collectors - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 192-210, 2015.

SUNFLOWER. **Catálogo de aquecedor solar de água**. 2024. Disponível em: [http://www.sunflower-solar.com/index\\_pt.php?act=channel&channel\\_id=322](http://www.sunflower-solar.com/index_pt.php?act=channel&channel_id=322). Acesso em: 18 nov. 2024.

TEIXEIRA, G. P. **Refrigeração a CO<sub>2</sub>**: solução centralizado vs solução descentralizada. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Portugal, 2024.

TOCCHIO, G. G. *et al.* Forecasting demand for air conditioning in the Brazilian residential sector. **Journal of Building Engineering**, v. 96, p. 110572, 2024.

TRANE. **Equipamentos chiller**. 2024. Disponível em: [https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/lar/br/produtos-sistemas/equipamentos/Chillers/Chillers\\_Scroll-Condensacao\\_Ar/CGAD/Catalogo\\_Produto-CGAD\(CG-PRC002G-PT0712\).pdf](https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/lar/br/produtos-sistemas/equipamentos/Chillers/Chillers_Scroll-Condensacao_Ar/CGAD/Catalogo_Produto-CGAD(CG-PRC002G-PT0712).pdf). Acesso em: 10 jan. 2024.

TSOUTSOS, T. *et al.* Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 2, p. 265-272, 2010.

VAZZOLER, A.; AGUIAR, M. Uma análise da refrigeração por absorção empregando uso de energia solar térmica e fluidos verdes como absorventes. **Revista Processos Químicos**, v. 15, n. 29, 2021.

VEGA, A. A. G. *et al.* Energía solar en aplicaciones mecánicas. **Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies**, v. 4, n. 1, p. 22-30, 2024.

WANG, R. Z. *et al.* Solar driven air conditioning and refrigeration systems corresponding to various heating source temperatures. **Applied energy**, v. 169, p. 846-856, 2016.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Healthy hospitals, healthy planet, healthy people**: addressing climate change in health care settings. Discussion draft. 2010. Disponível em: [www.who.int/docs/default-source/climate-change/healthy-](http://www.who.int/docs/default-source/climate-change/healthy-)

hospitals-healthyplanet-healthy-people.pdf?sfvrsn=8b337cee\_1. Acesso em: 11 jan. 2025.

WU, Z.; WAGNER, A. Thermal comfort of students in naturally ventilated secondary schools in countryside of hot summer cold winter zone, China. **Energy and Buildings**, v. 305, p. 113891, 2024.

YU, X.; JIANG, S.; ZHANG, S. Energy, exergy, economic and environmental assessment of solar photovoltaic direct-drive refrigeration system for electronic device cooling. **Renewable Energy**, v. 219, p. 119538, 2023.

ZHAO, B. *et al.* Conceptual development of a building-integrated photovoltaic–radiative cooling system and preliminary performance analysis in Eastern China. **Applied energy**, v. 205, p. 626-634, 2017.

ZHU, H. *et al.* Simulation of an improved solar absorption refrigeration system with phase change materials. **Energy Reports**, v. 8, p. 3671-3679, 2022.

## ANEXOS

## ANEXO A – PARECER DE AUTORIZAÇÃO DA INSTITUIÇÃO

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|   |  | <b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO</b><br><b>HOSPITAL UNIVERSITÁRIO</b><br><b>GERÊNCIA DE ENSINO E PESQUISA</b><br><b>COMISSÃO CIENTÍFICA — COMIC — HUUFMA</b>  |  |
| <b>PARECER DE AUTORIZAÇÃO</b>  |  |  |  |
| <b>Financiamento</b>   |  | <b>Finalidade do projeto</b>   |  |
| <input type="checkbox"/> Recurso Próprio<br><input type="checkbox"/> Fomento Público Nacional<br><input type="checkbox"/> Fomento Público Internacional<br><input type="checkbox"/> Fomento Privado Nacional / Ind. Farmacêutica<br><input type="checkbox"/> Fomento Privado Internacional / Ind. Farmacêutica |  | <input checked="" type="checkbox"/> Graduação<br><input type="checkbox"/> Especialização<br><input type="checkbox"/> Residência Multiprofissional<br><input type="checkbox"/> Residência Médica<br><input type="checkbox"/> Residência Buco Maxilo<br><input type="checkbox"/> Iniciação Científica<br><input type="checkbox"/> Dep. Acadêmico<br><input checked="" type="checkbox"/> Mestrado<br><input type="checkbox"/> Doutorado<br><input type="checkbox"/> Serviço/HU-UFMA<br><input type="checkbox"/> Outros/ Multicêntrico |  |
|  |  | <b>Nº do Protocolo:</b> 23523.044018/2024-03<br><b>Data de Entrada:</b> 23/09/2024<br><b>Parecer:</b> APROVADA   |  |

**I - IDENTIFICAÇÃO:**

|   |   |
|---|---|
| <b>Título - SISTEMAS DE ARREFECIMENTO SUSTENTÁVEIS APLICADOS A UNIDADES PÚBLICAS DE SAÚDE</b>   |   |
| <b>Pesquisador Responsável:</b> Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva Leite Coelho.   |   |
| <b>Unidade onde será realizado:</b> <input type="checkbox"/> HUPD <input checked="" type="checkbox"/> HUMI <input type="checkbox"/> CEPEC <input type="checkbox"/> Biobanco <input type="checkbox"/> Anexos |   |
| Setor de realização: registros em prontuário  |   |
| Cooperação estrangeira: <input type="checkbox"/>  | Multicêntrico: <input type="checkbox"/> |
| Coparticipante <input type="checkbox"/>   |   |

**II - OBJETIVOS**

**Geral :** O objetivo geral deste projeto de dissertação de mestrado é a proposta de um sistema de refrigeração a água, para aplicações hospitalares, por meio da aplicação de mecanismos de adsorção de energia solar. O sistema a ser desenvolvido emprega conceitos clássicos de termodinâmica e de transferência de calor, porém, será otimizado para atender às demandas relacionadas às aplicações do mesmo, em específico.

**Específicos :**

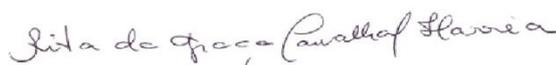
- Projeto de um sistema de arrefecimento baseado na tecnologia de adsorção solar, o qual pode ser acoplado ao sistema de arrefecimento do tipo *Chiller*, que é largamente utilizado em infraestruturas prediais de grande porte;
- Desenvolvimento de metodologias de dimensionamento de sistemas de arrefecimento, os quais operam conforme os conceitos de operação de *Chillers*, aplicando-se a carga térmica oriunda da energia proveniente da irradiação solar;
- Desenvolvimento de protótipos em escala reduzida, para avaliar o desempenho dos principais elementos que compõem o referido ciclo de arrefecimento;
- Desenvolvimento de modelos de simulação numérica simplificados para avaliar a eficiência

dos elementos que compõem o ciclo de refrigeração por absorção solar.

**III - CRONOGRAMA:** Início da coleta- outubro de 2023 **Final do estudo:** dezembro de 2024

**IV – NÚMERO:** O conforto térmico tem sido um conceito muito difundido em face de estar ligado à regulação metabólica do organismo humano. Além disso, traz benefícios, como proporcionar uma maior produtividade relacionada a profissionais executando tarefas em determinados ambientes laborais, auxiliar na prestação de cuidados em assistência de atenção básica e saúde e, até mesmo, garantir as condições ambientais ideais para a operação de equipamentos eletrônicos com alta dissipação de calor relativa ao conhecido efeito Joule. No Brasil, escassas plantas de instalações de sistemas aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) apresentam uma análise sobre as vertentes de viabilidade técnica, financeira e ambiental, principalmente em função da ampla matriz energética presente no país. **O presente estudo objetiva propor um sistema de refrigeração a água, para aplicações hospitalares, por meio da aplicação de mecanismos de adsorção de energia solar.** Será realizado um estudo de caso. Para coleta de dados, o estudo bedecerá ao seguinte roteiro: estimar, de forma aproximada, a carga térmica do ambiente a ser atendido, no caso, a proposta inicial é atender à demanda de leitos de unidades de terapia intensiva (UTIs); elaborar metodologias, baseadas em rotinas de cálculo, referentes à avaliação do coeficiente de desempenho de ciclos de arrefecimento por absorção solar, comparando os resultados obtidos concernentes a este ciclo de arrefecimento com os alcançados de acordo com a análise de ciclos convencionais de compressão de vapor; desenvolver metodologias experimentais, para avaliar os fenômenos de transporte relativos ao funcionamento de ciclos de arrefecimento por absorção solar, através da construção de modelos de operação em escala reduzida e desenvolver modelos de simulação numérica simplificados, acoplados a métodos analíticos, referentes aos fenômenos de transporte observados na operação dos elementos que compõem o ciclo de arrefecimento por absorção solar. Entre os resultados esperados, pode-se citar o desenvolvimento de modelos em escala reduzida, para verificação de fenômenos de transporte, em específico, tocantes à operação dos ciclos de arrefecimento, assim como a construção de modelos de simulação numérica, os quais têm a finalidade de reproduzir os referidos fenômenos.

São Luís, 04 de dezembro de 2024



**Profa. Dra. Rita da Graça Carvalho Frazão Corrêa**  
Gerente de Ensino e Pesquisa-GEP/HU-UFMA  
Matricula SIAPE: 407790