



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife

CACSEM

Engenharia Mecânica

LUCAS FREIRE DA LUZ MELO

**ANALISE TÉRMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SOLAR  
UTILIZANDO UM CHILLER DE ABSORÇÃO COM  $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$  COMO FLUIDO DE  
TRABALHO.**

Recife

2023

LUCAS FREIRE DA LUZ MELO

**ANALISE TÉRMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SOLAR  
UTILIZANDO UM CHILLER DE ABSORÇÃO COM NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> COMO FLUIDO DE  
TRABALHO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Alvaro Antonio Ochoa Villa

Recife

2023

Ficha elaborada pela bibliotecária Maria do Perpétuo Socorro  
Cavalcante Fernandes CRB4/1666

M528a  
2023

Melo, Lucas Freire da Luz

Análise Térmica de um sistema de refrigeração solar utilizando um Chiller de absorção com NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> como Fluido de trabalho. / Lucas Freire da Luz Melo. --- Recife: O autor, 2023.

69f. il. Color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, 2023.

Inclui Referências.

Orientador: Professor Dr. Álvaro Antônio Ochoa Villa.

1. Engenharia Mecânica- 2. Chiller por absorção. 3. PV/T. 4. Energia solar. I. Vila, Álvaro Antônio Ochoa. (orientador). II. Instituto Federal de Pernambuco. III. Título.

CDD 532 (21ed.)

**ANALISE TÉRMICA DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SOLAR UTILIZANDO  
UM CHILLER DE ABSORÇÃO COM NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> COMO FLUIDO DE TRABALHO.:**

Trabalho aprovado. Local, 09/02/2023.

---

Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa

---

Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

---

Dr. Alvaro Augusto Soares Lima

Recife

2023

Dedico este trabalho a minha família,  
que me apoiou durante minha vida toda.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a toda minha família e a minha namorada pelo suporte incondicional durante a minha jornada até agora.

A meus amigos e colegas da faculdade, por terem dividido comigo essa etapa única na minha vida.

Aos professores Alvaro Ochoa e José Eduardo, por acreditarem em mim e me fornecerem oportunidades de experienciar a vida acadêmica através do PIBIC. E também agradecer a todos professores e funcionários do departamento de mecânica pelo conhecimento e suporte durante o curso.

E a todos não citados aqui, mas que me apoiaram diretamente ou indiretamente durante essa jornada.

*“...Recordei-me de uma passagem das escrituras hindus, o Bhagavad-Gita. Vishnu está a tentar persuadir um príncipe de que deve fazer o seu dever, e para o impressionar assume a sua forma de múltiplo braços e diz, "Agora tornei-me a Morte, a destruidora de mundos". Imagino que todos nós pensamos assim, de uma maneira ou de outra.”*

*J. Robert Oppenheimer*

## RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo de caso onde um sistema de placas PV/T situado na cidade de Recife irá gerar eletricidade e água quente com o objetivo de alimentar um ponto comercial com eletricidade e utilizar a água quente para alimentar o chiller de absorção que irá climatizar o ambiente comercial. Foi proposto a utilização de NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> como fluido de trabalho do chiller. Foi escolhido esse fluido devido ao fato de se eliminar a necessidade do retificador no chiller e devido a suas temperaturas de trabalho serem menor do que a temperatura em outros fluidos normalmente utilizados. O modelo aplicado neste trabalho foi desenvolvido utilizando o software *Engineering Equation Solver*, calculando a geração de energia elétrica e o calor produzido pelo sistema PV/T junto com a quantidade de calor frio produzido pelo chiller e verificando se o mesmo é capaz de manter o conforto térmico no ambiente em estudo. A carga térmica do ambiente climatizado foi determinada utilizando a metodologia estabelecida na norma NBR 16401 e segundo as dimensões da planta baixa do empreendimento. A simulação foi realizada utilizando a radiação solar média mensal do ano. A carga térmica máxima calculada para o espaço a ser climatizado é de 2,5 kW durante o mês de dezembro no mesmo o chiller de absorção gera por volta de 4,7 kW de calor frio, sendo suficiente para climatizar o ambiente e o sistema PV/T fornece cerca de 37,66W/hr durante esse mesmo mês. Os outros resultados obtidos demonstram que o chiller foi dimensionado de maneira suficiente para manter o conforto térmico durante os picos de calor em cada mês durante o ano e também da necessidade de se ter um tanque de termo acumulação devido a sazonalidade da radiação solar.

Palavras-chave: Chiller por Absorção; PV/T, energia solar.



## **ABSTRACT**

In the air conditioning and thermal comfort sector, the study and implementation of systems that use clean and renewable energy and that work reliably are becoming very important. In this work, a case study was carried out where a plate system located in the city of Recife will generate electricity and hot water in order to supply electricity to a commercial point and use the hot water to feed the absorption chiller that will air-conditioning the commercial environment. It has been proposed to use  $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$  As The Chiller's Working Fluid. This fluid was chosen because it eliminated the need for a rectifier in the chiller and because its working temperature is lower than the temperature of other fluids normally used. The model applied in this work was developed using the software, calculating the generation of electricity and heat by the PV/T system together with the amount of cold heat produced by the chiller and verifying whether it is capable of maintaining thermal comfort in the environment whose thermal load was determined using the 16401 standard and the floor plan of the enterprise. The simulation was performed using the average solar radiation in each month of the year. The results obtained demonstrate that the chiller was sized enough to maintain thermal comfort during the heat peaks in each month during the year and also the need to have a thermo-accumulation tank due to the seasonality of solar radiation.

Keywords: chiller. Absorption. PV/T.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Representação esquemática de um SRA.25	
Figura 2-Ciclo por absorção simples. ....	18
Figura 3-Camadas de uma Placa PV/T.....	21
Figura 4 - Funcionamento de um ciclo de absorção.....	22
Figura 5-Fluxograma de trabalho de um sistema PV/T-chiller de absorção.....	23
Figura 6-Coletor solar plano.36	
Figura 7- Funcionamento da integração célula PV/T e chiller. ....	25
Figura 8-Inclinação da terra e as estações do ano.....	26
Figura 9-Ângulos para calcular a incidência de radiação. ....	27
Figura 10-Sistema modelado simplificado.....	29
Figura 11-Regressão Polinomial de 4° ordem da radiação para o mês de Janeiro em Recife43	
Figura 12-Sistema PV/T integrado com o chiller por absorção.47	
Figura 13-Modelo do chiller de absorção utilizado.48	
Figura 14-Fluxos mássicos e de calor no Gerador49	
Figura 15-Fluxos mássicos e de calor no Absorvedor50	
Figura 16-Fluxos mássicos e de calor no trocador de calor51	
Figura 17-Fluxos mássicos na bomba52	
Figura 18-Fluxos mássicos e de calor no condensador53	
Figura 19-Fluxos mássicos nas Válvulas54	
Figura 20-Fluxos mássicos e de calor no Evaporador54	
Figura 21-Planta baixa do espaço climatizado55	
Figura 22-Calor para climatizar o espaço proposto.57	
Figura 23-Energia elétrica e Calor gerado pelo sistema PV/T58	
Figura 24-Temperatura da água quente gerada pelo sistema PV/T58	
Figura 25-Calor no Gerador, Evaporador e Condensador do chiller. (Lucas adiciona também o calor do absorvedor)59	
Figura 26 -Carga térmica e o calor frio gerado no evaporador60	

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1-Vantagens e desvantagens do NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> como fluido de trabalho40  
43

Tabela 3-Dados Tanque Termo Acumulador45

Tabela 4-Levantamento de cargas térmicas56

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>A</b>	<b>Área</b>
<b>cp</b>	<b>Calor específico</b>
<b>D</b>	<b>Diâmetro</b>
<b>G</b>	<b>Radiação</b>
<b>h</b>	<b>Coeficiente de trocar de calor por convecção</b>
<b>k</b>	<b>Coeficiente de condutividade térmica</b>
<b>L</b>	<b>Comprimento da tubulação</b>
<b>m</b>	<b>Fluxo mássico</b>
<b>n</b>	<b>Número de dias</b>
<b>Nu</b>	<b>Número de Nusselt</b>
<b>N<sub>p</sub></b>	<b>Número de coletores solares utilizados</b>
<b>Q</b>	<b>Fluxo de calor</b>
<b>Ra</b>	<b>Número de Rayleigh</b>
<b>T</b>	<b>Temperatura</b>
<b>t</b>	<b>Tempo</b>
<b>U</b>	<b>Coeficiente global de troca térmica</b>
<b>W</b>	<b>Energia elétrica gerada pelo sistema PV/T</b>
$\beta$	<b>Inclinação da Placa PV/T</b>
$\delta$	<b>Declinação solar</b>
$\varphi$	<b>Latitude</b>
$\gamma$	<b>Ângulo azimutal da superfície</b>
$\gamma_s$	<b>Ângulo de azimute solar</b>
$\theta$	<b>Ângulo de incidência</b>
$\theta_z$	<b>Ângulo de zênite</b>
$\varepsilon$	<b>Efetividade</b>
$\eta$	<b>Eficiência</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>1.2 Justificativa/Motivação</b>	<b>27</b>
<b>1.3 Objetivos</b>	<b>27</b>
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b>	<b>28</b>
<b>1.3.2. Objetivos específicos</b>	<b>28</b>
<b>1.4 Metodologia empregada</b>	<b>28</b>
<b>2 ESTADO DA ARTE</b>	<b>30</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>34</b>
<b>3.1 CHILLER POR ABSORÇÃO</b>	<b>34</b>
<b>3.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO TÉRMICO</b>	<b>36</b>
<b>3.3 RADIAÇÃO SOLAR</b>	<b>37</b>
<b>3.4 FLUIDO REFRIGERANTE NH<sub>3</sub>/LiNO</b>	<b>339</b>
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>41</b>
<b>4.1 COLETORES PV/T</b>	<b>41</b>
<b>4.2 RADIAÇÃO</b>	<b>42</b>
<b>4.3 MODULO PV/T</b>	<b>43</b>
<b>4.4 TANQUE DE TERMO ACUMULAÇÃO</b>	<b>44</b>
<b>4.5 CHILLER POR ABSORÇÃO</b>	<b>46</b>
<b>4.5.1 GERADOR</b>	<b>49</b>
<b>4.5.2 ABSORVEDOR</b>	<b>50</b>
<b>4.5.3 TROCADOR DE CALOR</b>	<b>51</b>
<b>4.5.4 BOMBA</b>	<b>52</b>
<b>4.5.5 CONDENSADOR</b>	<b>52</b>
<b>4.5.6 VÁLVULAS DE EXPANSÃO</b>	<b>53</b>
<b>4.5.7 EVAPORADOR</b>	<b>54</b>
<b>4.6 CARGA TÉRMICA</b>	<b>55</b>
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISE</b>	<b>56</b>
<b>5.1 CARGAS TÉRMICAS</b>	<b>56</b>
<b>5.2 SISTEMA PV/T</b>	<b>57</b>
<b>5.3 CHILLER</b>	<b>59</b>
<b>6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>62</b>

## **6.1 TRABALHOS FUTUROS62**

REFERENCIAS64

Glossário (opcional)66

Apêndice (opcional)67

Anexo (opcional)68

Índice (opcional)69

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios modernos é controlar as condições de ar em um ambiente através do controle de umidade e temperatura com o objetivo de conseguir o conforto térmico ótimo. Uma das estratégias mais eficazes para manter um ambiente climatizado é o uso de um sistema de climatização por absorção (SRA). Essa tecnologia tem se destacado cada vez mais na área de conforto térmico, sendo considerada uma opção eficiente, com uma relação custo-benefício favorável e de baixo impacto ambiental.

O SRA é formado pelos seguintes elementos: gerador, condensador, válvula de expansão, evaporador, absorvedor, válvula redutora e uma bomba de circulação da solução, segundo a Figura 1.

Fonte: Adaptado pelo Autor.

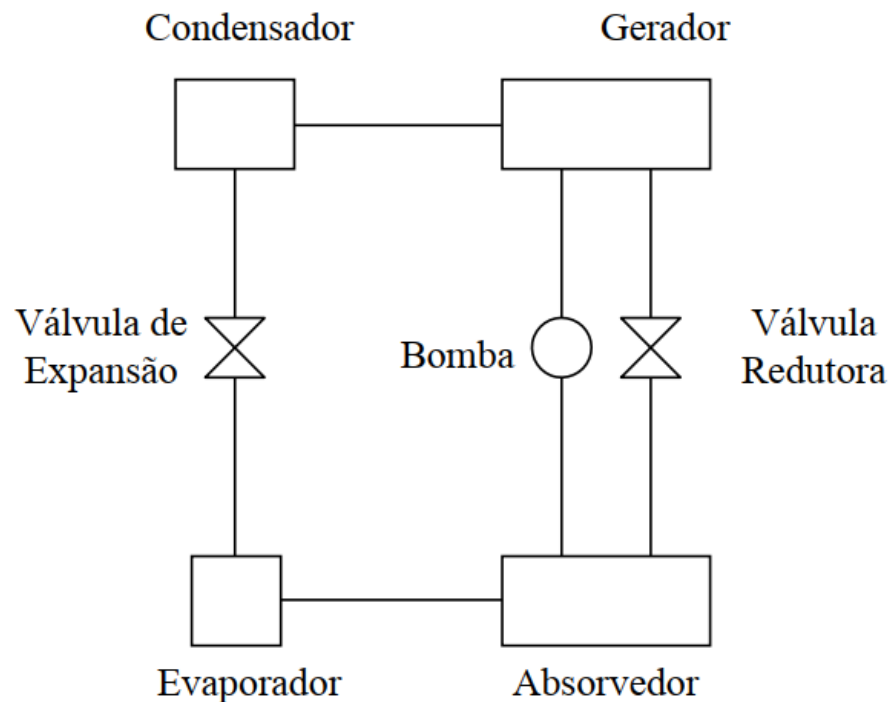


Figura 1 - Representação esquemática de um SRA.

A característica que mais define um SRA é a utilização de um fluido especial de trabalho o qual é resultado da mistura de duas substâncias com propriedades diferentes cujo objetivo de uma é ser um fluido refrigerante e a outra é ser um fluido

absorvente. Diversas substâncias podem ser misturadas para serem utilizadas como fluido de trabalho em um SRA, sendo as mais comuns: Amônia/Água, Água-Brometo de Lítio, amônia/nitrato de lítio, entre outros (Lima et al., 2019). Estes fluidos são normalmente utilizados em sistemas de climatização pois eles demonstram uma maior capacidade de funcionar em fontes de calor a uma baixa temperatura (Alves, 2018). Essa tecnologia opera sem a necessidade de eletricidade, sendo acionada por meio da queima de gás (acionamento direto) ou por meio de água quente ou rejeitos térmicos (acionamento indireto). No acionamento indireto, está fortemente vinculado à cogeração de energia (Alcântara et al., 2019; Alcântara et al., 2022). Outro aspecto importante é que devido às baixas temperaturas a energia solar representa outra alternativa para o acionamento dos chillers de absorção, representando uma alternativa sustentável na produção de frio de climatização.

A utilização de energia solar como a fonte primária de alimentação para o SRA tem como função mitigar e reduzir o impacto no meio ambiente através do uso de uma matriz energética renovável e também atrelada ao constante aumento no valor da energia elétrica cobrada pelas companhias de fornecimento elétrico, a energia solar se demonstra como uma opção extremamente economicamente viável.

As tecnologias utilizadas para fazer a transformação de energia solar em energia elétrica e térmica são os coletores solares, através de células híbridas chamadas de placas fotovoltaica térmica (PV/T) que comportam a geração simultânea de eletricidade e calor em um único dispositivo.

Nos últimos anos, o sistema de coletores PV/T tem despertado considerável interesse devido à sua capacidade de combinar um coletor solar térmico, que converte a radiação eletromagnética em energia térmica por meio da circulação de um fluido de trabalho, normalmente água. A água é especialmente adequada para esse propósito devido à sua alta capacidade térmica e propriedades de absorção de luz no espectro infravermelho, o que a torna altamente compatível com as placas fotovoltaicas. Essas placas, por sua vez, produzem corrente elétrica através do efeito fotovoltaico, resultante da interação da luz solar com o material do painel fotovoltaico (Daghigh e Ruslan, 2011).

As temperaturas e vazões do fluxo de ar externos são parâmetros que podem apresentar variabilidade nesse tipo de sistema de climatização logo estudar os efeitos gerados por esses parâmetros na da condição de operação e da performance do SRA



no modelo criado é máxima importância para nos dar um entendimento mais profundo da tecnologia empregada nesse sistema de condicionamento de ar.

Este trabalho irá proporcionar uma análise termodinâmica de um sistema de climatização solar por absorção, utilizando um chiller de absorção que utiliza uma solução de Amônia/Nitrato de Lítio ( $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ ) e sistemas fotovoltaicos, cujo objetivo será a climatização de um espaço comercial com carga térmica de 10 kW, considerando as condições de conforto térmico de 22°C de temperatura e 55% de umidade relativa do ar. O sistema será acionado através do aquecimento de água das placas fotovoltaicas, e a eletricidade produzida será consumida no mesmo local, com parte de iluminação e outros acessórios. Um modelo termodinâmico será construído na plataforma EES visando a análise energética e financeira do sistema.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Os aumentos crescentes nos valores da tarifa elétrica junto com a crise hídrica recém enfrentada pelo país nos faz buscar diferentes alternativas para otimizar o consumo energético nos sistemas de geração de frio para a climatização. Sendo a utilização de coletores solares uma alternativa viável e sustentável para a geração adequada de energia para alimentar um chiller por absorção.

Uma grande motivação para trabalhar com este tema é a imersão dos estudos realizados durante meu período de aluno bolsista PIBIC, no grupo de pesquisa STFMi, onde estou inserido, o qual vêm trabalhando com equipamentos de refrigeração por absorção, através de diferentes estudos relacionados com geração de energia para processos industriais (Alcântara et al., 2019; Leite et al., 2020) e comerciais, especificamente, atender demandas de eletricidade e climatização em hotéis (Leite et al., 2021), assim como estudos de transferência de calor e massa em chillers por absorção (Lima et al., 2019 e 2022).

## **1.3 OBJETIVOS**

O desenvolvimento de um sistema de climatização eficiente energeticamente está diretamente atrelado a tecnologia utilizada para a geração de frio e da maneira que é obtida a energia que faz o sistema funcionar (MOREIRA, 2017). Promover a

evolução tecnológica, melhoria da utilização dos equipamentos e a diminuição do desperdício justificam o investimento em estudos e novas tecnologias que visam mudar o paradigma atual em que se encontra o setor de climatização e refrigeração brasileiro.

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

O presente estudo visa realizar uma análise energética e termodinâmica de um sistema de climatização por absorção alimentado por um conjunto de placas fotovoltaica térmica. Desta forma identificar a aplicabilidade desse sistema de acordo com a eficiência deste tipo conjunto no papel proposto.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Levantar a revisão bibliográfica sobre os sistemas de refrigeração por absorção e energia solar fotovoltaico;
- Compreender o funcionamento do ciclo de refrigeração por absorção, e sistemas fotovoltaicos;
- Modelar e simular um sistema de refrigeração por absorção e o sistema fotovoltaico;
- Integrar o sistema de refrigeração por absorção solar considerando a carga térmica;
- Realizar uma análise energética do sistema de refrigeração por absorção solar considerando um caso de estudo.

### **1.4 METODOLOGIA APLICADA**

O trabalho se inicia-se com uma revisão do estado da arte dos sistemas de climatização por absorção e dos sistemas de coletores fotovoltaicos térmicos, após será modelado na plataforma EES (*Engineering Equation System*) um chiller de absorção que utiliza uma solução de Amônia/Nitrato de lítio ( $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ ) como fluido de trabalho, para alcançar o conforto térmico em uma sala comercial com carga

térmica de 10 kW. Além disso, será criado um modelo para dimensionar um sistema PV/T adequado às necessidades do chiller, que permitam a simulação e análise energética do sistema térmico.

## 2 ESTADO DA ARTE

O capítulo a seguir irá abordar uma série de diversos trabalhos e estudos referentes a sistemas de climatização por absorção e a coletores solares PV/T; sobre o seu funcionamento, importância e modelos numéricos para a sua simulação.

Ochoa et al. (2014) elaborou um estudo numérico de um chiller de absorção (LiBr-H<sub>2</sub>O) de efeito simples em regime permanente com 10TR de potência, figura 2, integrado a um sistema de cogeração energética com capacidade de operação de 30kW. O estudo foi direcionado a uma análise energética avaliando os principais parâmetros de funcionamento do sistema e a sua influência no COP do chiller.

Fonte: Ochoa, 2014.

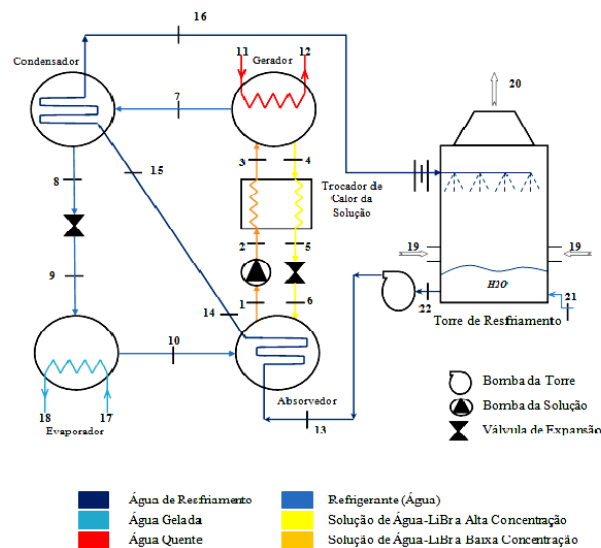


Figura 2-Ciclo por absorção simples.

Entre as conclusões obtidas, podemos destacar:

- O modelo utilizado gerou resultados com erro menor do que 5% comparado com resultados fornecidos pelos fabricantes.
- O payback desse sistema é estimado em um tempo mínimo de 5 anos.

Também em relação a análise numérica de chillers de absorção e sua eficiência, Lima et al. (2019) investigou a utilização da solução amônia/água como fluido de trabalho. A análise foi feita a partir de uma abordagem simulatória baseada na utilização de equações de conservação da massa, energia e movimento; utilizando o software ANSYS para simulações fluidodinâmicas para solucionar as equações.

Os resultados demonstram:

- Não existe uma relação linear entre o aumento do vapor refrigerante e quantidade de amônia presente da solução.

- Mas existe uma dependência da capacidade de absorção e do percentual de massa existente na entrada do absorvedor do chiller.

Acuña et al. (2016) elaborou uma análise dinâmica de um sistema de climatização por absorção com coletores solar utilizando dois diferentes fluidos de trabalho, amônia-nitrato de lítio e amônia-tiocianato de sódio. O estudo focou no efeito da temperatura do gerador do sistema de climatização por absorção para encontrar a temperatura que gera maior eficiência no sistema.

Entre as conclusões obtidas temos:

- Os coletores de tubo evacuados com amônia e nitrato de lítio se demonstram entre 5% e 54% melhores do que os outros sistemas.
- O  $\text{NH}_3\text{-NaSCN}$  precisou de mais energia do sistema de absorção para ser ativado do que o  $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ .

Guido et al. (2018) realizaram um trabalho sobre o desempenho de chillers de absorção com capacidade variando entre 30kW e 160kW com cargas parciais ou totais. Os equipamentos foram submetidos a diversos testes de campo com o objetivo de aumentar a eficiência do equipamento.

Segundo os autores as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- Os chillers de pequeno e médio de absorção ainda não estão no mesmo patamar de eficiência energética que os sistemas de compressão.
- Apesar dos chillers de absorção não serem ainda extremamente eficientes eles têm uma melhor associação com coletores solares ou sistemas de tri geração de energia.

Giorgio et al. (2015) produziram uma modelagem simples para avaliar o desempenho de um sistema de coletores solar PV/T que utilizam uma serpentina com fluxo forçado de água acoplada na parte traseira do módulo. O objetivo do artigo é avaliar o comportamento da placa fotovoltaica com a serpentina atuando como um trocador calor resfriando a coletor.

Os resultados demonstram:

- Um aumento da eficiência dos módulos solares com a diminuição da temperatura de operação do sistema.

Em Hu et al. (2020), os autores empreenderam uma análise numérica sobre a performance de um sistema de coletores solares PV/T que utilizam água como fluido de trabalho. O método matemático utilizado foi baseado nas diferenças finitas cujo os resultados obtidos foram comparados com os resultados de um sistema comum. Além disso foi feita uma investigação paramétrica do desempenho dos coletores quando é variada a temperatura de entrada da água, o grau de aplicação de vácuo, a emissividade da cobertura do módulo solar e o coeficiente de temperatura da célula fotovoltaica.

Entre os resultados obtidos pelos pesquisadores temos:

- Ganho de eficiência do sistema de aproximadamente 9,10% quando o mesmo está operando a uma temperatura de 90°C.
- Quando se varia o percentual de vácuo aplicado nos coletores de 100% a 0% temos um aumento no valor de energia elétrica em contrapartida o valor da energia térmica diminui.

Rejet et al. (2015) desenvolveram um modelo matemático para simular o comportamento dinâmico de um coletor solar PV/T em uma zona semiárida. Os parâmetros avaliados pelo modelo de balanço de energia foram: o fator de incidência de radiação solar, a temperatura de entrada do fluido de trabalho, número de cobertura de vidro e o coeficiente de transferência de calor condutivo entre o coletor solar e absorvedor.

Os resultados obtidos demonstram:

- O coletor solar PV/T tem uma maior eficiência térmica quanto maior é a radiação solar e o coeficiente de condução de calor.
- Já a eficiência elétrica aumenta com fator de preenchimento entre as placas e com o coeficiente de condução.

Já Lima et al. (2015) elaboram um estudo para estudar a viabilidade técnico-econômica de um sistema de aquecimento de água com células PV/T em uma lavanderia na cidade de Recife em Pernambuco. O algoritmo criado para o estudo usa como principais parâmetros de otimização o ângulo de inclinação do coletor solar, a taxa de fluxo de água e a área dos coletores.

Os resultados do estudo demonstram:

- Que a variação mensal ou sazonal do ângulo de inclinação das placas não afeta positivamente a viabilidade econômica do projeto em comparação com a posição fixa.
- A mudança nos valores das tarifas de energia e do custo dos coletores não afetou a viabilidade econômica.

Nizetic et al. (2016) fizeram um método numérico iterativo para determinar a distribuição de temperatura em volta de placas fotovoltaicas com o objetivo de encontrar uma maneira de resfriar as placas por transferência convectiva de calor pelo ar durante sua operação. O trabalho usou o software ANSYS FLUENT para simular o modelo desenvolvido pelos autores.

Através das simulações realizadas podemos verificar que:

- A temperatura no módulo solar aumenta com o passar do dia e acaba afetando negativamente o desempenho do módulo.
- Utilizando a maneira de resfriamento dos coletores proposta pelos autores vemos sim uma variação na temperatura de operação do sistema e um aumento na produção de energia.

Bhattari et al. (2012) produzem um modelo de simulação unidimensional em regime transiente para uma placa PV/T, fazem a sua validação e também comparam ele com uma célula fotovoltaica convencional. O modelo foi criado a partir das equações de conservação da energia que foi então aplicada a cada camada do coletor PV/T e do coletor comum. Os autores utilizaram a ferramenta computacional MATLAB para resolver as equações ordinárias de primeiro grau do modelo.

A partir dos resultados obtidos pelos autores podemos afirmar que:

- A eficiência elétrica do sistema com coletores PV/T é 13,68% maior do que a do convencional.
- Mas a eficiência térmica diária do convencional conseguiu ser 18% maior do que a do sistema PV/T.

E por último temos os materiais que compõem a célula PV/T, Vaishak e Bhale (2021) elaboram uma análise de uma célula solar composta de uma camada de vidro, outra de cobre e TPT (tedlar-polister-tedlar), Figura 3. Os autores fizeram um modelo unidimensional com regime estacionário e depois validaram empiricamente o modelo criado. Os principais parâmetros analisados no modelo foram as variações da espessura da folha traseira e da radiação solar absorvida pela placa.

Entre os resultados obtidos no estudo podemos ressaltar:

- O ganho térmico de 548W para o cobre, 534W para o vidro e 525 para o TPT.
- Que conseqüentemente o cobre demonstrar ter o maior COP.

Fonte: Vaishak e Bhale, 2014.

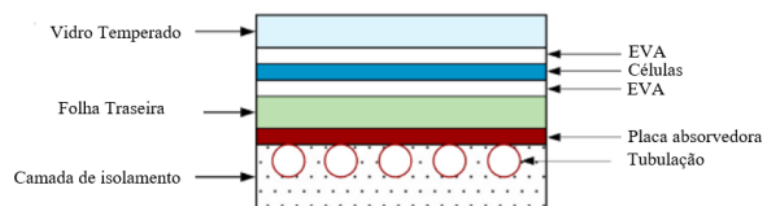


Figura 3-Camadas de uma Placa PV/T

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste presente capítulo serão abordados os fundamentos teóricos para os resfriadores de líquidos por absorção (chillers de absorção), o fluido de trabalho escolhido e para as células PV/T. O estudo inicia-se com uma revisão detalhada dos conceitos teóricos envolvidos no funcionamento do chillers de absorção e seus principais componentes seguido por uma comparação entre os principais fluidos de trabalho comercialmente encontrados na nossa realidade e por que da escolha da solução de Amônia com nitrato de Lítio e por último uma exposição dos principais aspectos envolvidos no funcionamento de um coletor híbrido fotovoltaico térmico.

#### 3.1 CHILLER POR ABSORÇÃO

O ciclo de refrigeração de um sistema de absorção é composto por: Gerador, Condensador, Evaporador, Absorvedor, Bomba e válvulas de expansão e redução. Os chillers de absorção funcionam movendo calor do fluido secundário (fluido absorvente) para o fluido primário (fluido refrigerante), criando assim uma divisão, no ciclo de absorção entre baixa pressão e alta pressão, conforme figura 4. (Fonseca Jr, 2013).

Fonte: Fonseca Jr, 2013.

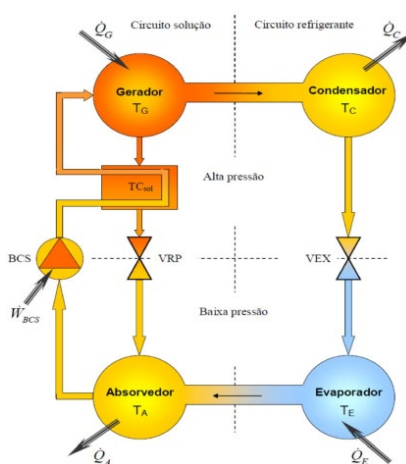


Figura 4 - Funcionamento de um ciclo de absorção.

Cada componente utilizado num sistema de climatização por absorção tem por natureza uma atividade singular a qual o seu funcionamento é indispensável para um chiller de absorção, Figura 5.



Fonte: Ferreira,2018

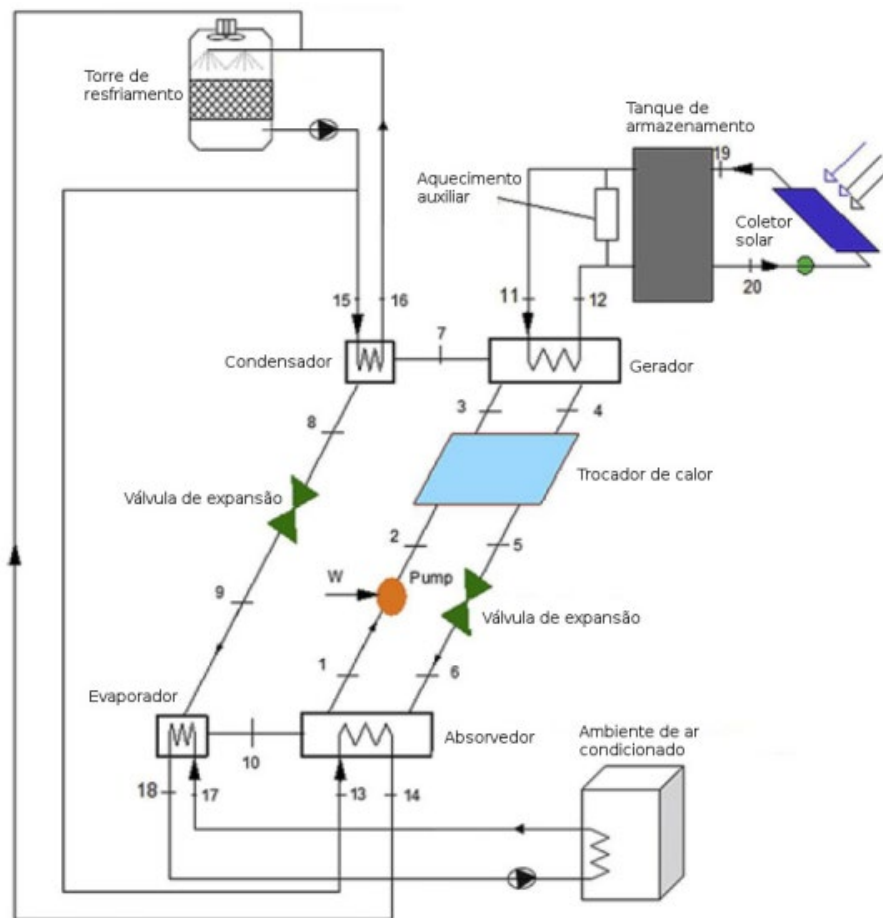


Figura 5-Fluxograma de trabalho de um sistema PV/T-chiller de absorção.

- Na câmara geradora temos a entrada da solução do fluido absorvente com o fluido refrigerante e a separação do refrigerante da solução através do processo de dessorção. Neste processo é fornecida energia térmica a um alta temperatura para a solução evaporando o fluido refrigerante da solução.
- Após essa etapa, a solução restante direciona-se ao absorvedor, onde uma válvula redutora de pressão é responsável por criar uma redução de pressão. Essa redução de pressão é eficaz na remoção completa de qualquer pequena concentração residual de fluido refrigerante presente na solução.

- O refrigerante na forma de vapor sai do gerador normalmente em alta pressão indo diretamente para o condensador que é o responsável por resfriar o fluido e mudar o mesmo de estado, do vapor para o líquido saturado.
- O fluido refrigerante segue então para o evaporador, onde o fluido troca calor com o fluido de arrefecimento.
- Após o fluido refrigerante ser absorvido a mistura segue então para a bomba que joga o fluido novamente para o gerador reiniciando assim o ciclo de absorção

### 3.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO TÉRMICO

Os coletores de placa PV/T são equipamentos que combinam componentes de sistemas fotovoltaicos com sistemas térmicos, com o objetivo de gerar calor e eletricidade ao mesmo tempo (Chow, 2010). Sendo extremamente compactos em comparação com as outras alternativas disponíveis com o uso indicado para ambientes residências e comerciais pequenos, Figura 6.

Fonte: [www.temsustentavel.com](http://www.temsustentavel.com)(23/10/2022)



Figura 6-Coletor solar plano.

O funcionamento de um sistema PV/T é relativamente simples, na parte frontal do modulo temos a célula fotovoltaica responsável pela captação de radiação solar e sua transformação em energia elétrica através do efeito fotoelétrico e na parte traseira do modulo temos o coletor solar que absorve a energia térmica para esquentar o fluido de trabalho do sistema(água) que segue então para o gerador do chiller de absorção com a função de evaporar o a mistura refrigerante do ciclo de absorção, figura 7.

Fonte: Adaptado Autor.

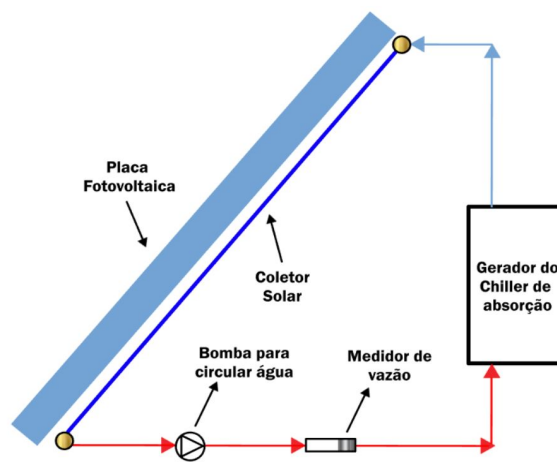


Figura 7- Funcionamento da integração célula PV/T e chiller.

### 3.3 RADIAÇÃO SOLAR

Única fonte de energia para o sistema PV/T é a radiação solar que chega na terra após viajar  $1,39 \times 10^9$ m (Duffie; Beckman, 2013). O sol emite radiação num fator quase constante chamada de Constante solar cujo o seu valor é de  $1367 \text{ W/m}^2$  mas a radiação incidente sobre a terra acaba variando devido aos dois movimentos que o planeta faz, rotação e translação. A rotação que a terra faz em relação ao seu próprio eixo é o que nos dá os ciclos de dia e noite, já a inclinação da terra em relação a sua translação ao redor do sol nos as diferentes estações do ano, Figura 8.

Fonte: Moreira(2019)

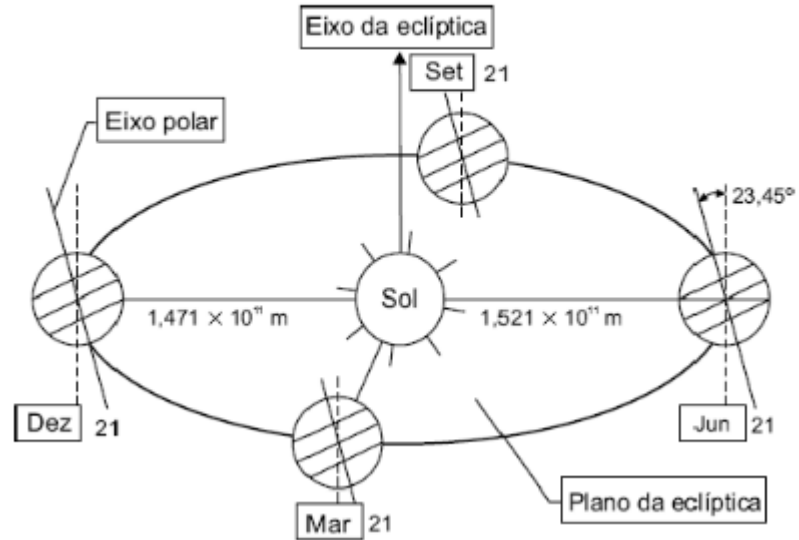


Figura 8-Inclinação da terra e as estações do ano.

Para se calcular a incidência de radiação sobre uma superfície na terra temos que conhecer os seguintes ângulos de acordo com Duffie; Beckman (2013), conforme Figura 9.

Fonte: Lima (2021).

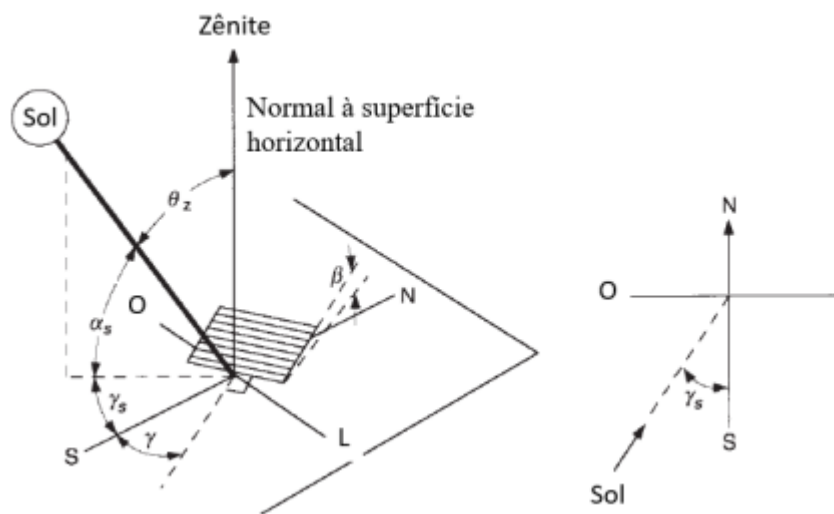


Figura 9-Ângulos para calcular a incidência de radiação.

- Ângulo de incidência ( $\theta$ ): É o ângulo formado pelo raio solar e a normal da superfície.
- Ângulo de inclinação da superfície ( $\beta$ ): Formado pelo ângulo da face frontal da superfície com o solo.
- Ângulo de azimute da superfície ( $\gamma$ ): Ângulo gerado pela projeção da normal da superfície e o Norte, Variando entre  $-180^\circ$  e  $180^\circ$ .
- Ângulo de declinação solar ( $\delta$ ): Inclinação do sol em relação ao plano equatorial no horário de meio dia.
- Latitude ( $\varphi$ ): É a coordenada geográfica na terra da superfície em relação a linha do equador variando entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ .
- Ângulo de azimute solar ( $\gamma_s$ ): Inclinação da projeção da radiação no plano e o Norte.
- Ângulo de zenite ( $\theta_s$ ): É o ângulo gerado pela incidência de radiação e uma superfície horizontal.

### 3.4 FLUIDO REFRIGERANTE NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub>

A utilização da mistura amônia/Nitrato de Lítio como fluido refrigerante nos chillers de absorção tem se mostrado bem promissora pois ao contrário dos fluidos mais convencionais como LiBr/H<sub>2</sub>O e NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O que geram bastante problemas de corrosão, alta pressão no sistema e cristalização (Akrami et al., 2018). O NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> também demonstra resultados extremamente promissórios em relação ao seu COP, Ventas et al. (2016) demonstrou que utilizando uma configuração de dois estágios num ciclo de absorção de duplo-efeito o COP máximo é de 1,25.

Outra vantagem da utilização de amônia/Nitrato de Lítio é na simplificação do chiller em si pois a utilização desse fluido dispensa a necessidade de um retificador no sistema absorção.

Fonte: Ochoa

Fluido de trabalho: NH <sub>3</sub> /LiNO <sub>3</sub>	
Vantagens	Desvantagens
O retificador pode ser eliminado do sistema.	Performance limitada pela alta viscosidade típica de soluções salinas.
Alta solubilidade da amônia e baixa corrosão em aço.	
Menor temperatura de operação do que as outras soluções mais comuns.	

Tabela 1-Vantagens e desvantagens do NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> como fluido de trabalho

## 4 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo será apresentar o sistema de refrigeração por absorção e as placas PV/T junto com cada componente individual envolvidos no ciclo seguindo a sua respectiva ordem de funcionamento e as equações determinam as propriedades termodinâmica de cada produto gerado.

### 4.1 COLETORES PV/T

A modelagem da placa do coletor solar será feita de acordo com as camadas do sistema e em cada camada será feita o balanço de energia com o objetivo de se obter os valores de temperatura, potência, fluxo de calor e eficiência do coletor.

A placa PV/T pode ser dividida em seis camadas distintas, cada uma com a sua modelagem própria adequada, as camadas são: A cobertura de vidro das células fotovoltaicas , seguido pelas células em si, temos o absorvedor térmico logo abaixo a camada fotovoltaica, logo em seguida temos os tubos em que o fluido de trabalho passa, ao redor dos tubos temos o isolamento da célula PV/T e por último temos o fluido de trabalho. A disposição das camadas pode ser vista na Figura 10.

Fonte: O autor

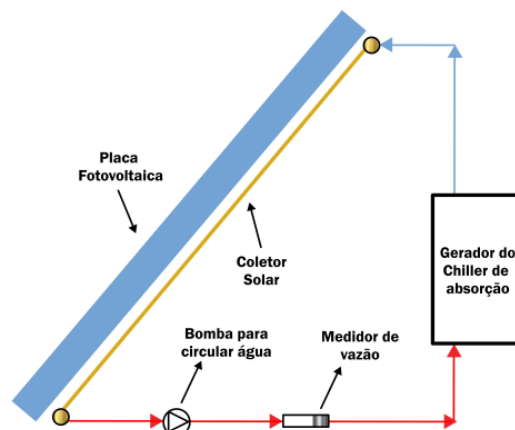


Figura 10-Sistema modelado simplificado

O modelo que será utilizado no trabalho para um coletor PV/T tipo placa plana ele realiza o balanço de energia global em regime permanente.

## 4.2 RADIAÇÃO

A incidência de radiação solar sobre a placa PV/T foi aproximada por uma equação média da radiação solar gerada por uma regressão polinomial de quarta ordem dos valores de radiação na tabela 2. Um exemplo da equação média pode ser visto na Figura 11.

Fonte: O autor.

Hora	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	122, 7299	119, 7047	119, 2087	103, 2397	97,2 3892	93,61 861	93,8 1698	113, 5551	124, 912	127 ,54 04	131, 855	127, 6396
8	292, 4939	284, 6976	283, 4196	242, 2655	226, 8008	217,4 709	217, 9821	268, 8495	298, 1174	304 ,89 12	316, 0105	305, 1468
9	471, 4289	458, 6078	456, 506	388, 8277	363, 3958	348,0 526	348, 8933	432, 5454	480, 6768	491 ,81 64	510, 1022	492, 2368
10	633, 2775	615, 9137	613, 0672	521, 4092	486, 9663	466,1 867	467, 3253	580, 6168	645, 8022	660 ,88 87	685, 6534	661, 458
11	751, 8867	731, 1948	727, 8027	618, 5766	577, 532	552,7 695	554, 1264	689, 1325	766, 812	784 ,79 02	814, 3016	785, 4686
12	807, 0421	784, 8028	781, 157	663, 7627	619, 6486	593,0 344	594, 4927	739, 5951	823, 0836	842 ,40 63	874, 1246	843, 1354
13	789, 0964	767, 3606	763, 7973	649, 0606	605, 9452	579,9 334	581, 3587	723, 1762	804, 7747	823 ,66	854, 6603	824, 3726
14	701, 2043	681, 9345	678, 7755	577, 0559	538, 8321	515,7 714	517, 035	642, 763	715, 1039	731 ,84 66	759, 3298	732, 4784
15	558, 5902	543, 3226	540, 8197	460, 2263	429, 9412	411,6 701	412, 6712	512, 2866	569, 603	582 ,86 84	604, 6436	583, 3689
16	385, 0362	374, 6408	372, 9366	318, 0626	297, 4423	285,0 019	285, 6836	353, 5092	392, 5345	401 ,56 66	416, 3928	401, 9074
17	207, 493	202, 085	201, 1984	172, 6513	161, 924	155,4 521	155, 8067	191, 0917	211, 3938	216 ,09 25	223, 8056	216, 2699



18	50,1 9112	49,2 0644	49,0 4502	43,8 4721	41,8 94	40,71 562	40,7 8019	47,2 048	50,9 0138	51, 756 92	53,1 613	51,7 8921
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 2-Valores da radiação média durante um ano

Fonte: O autor.

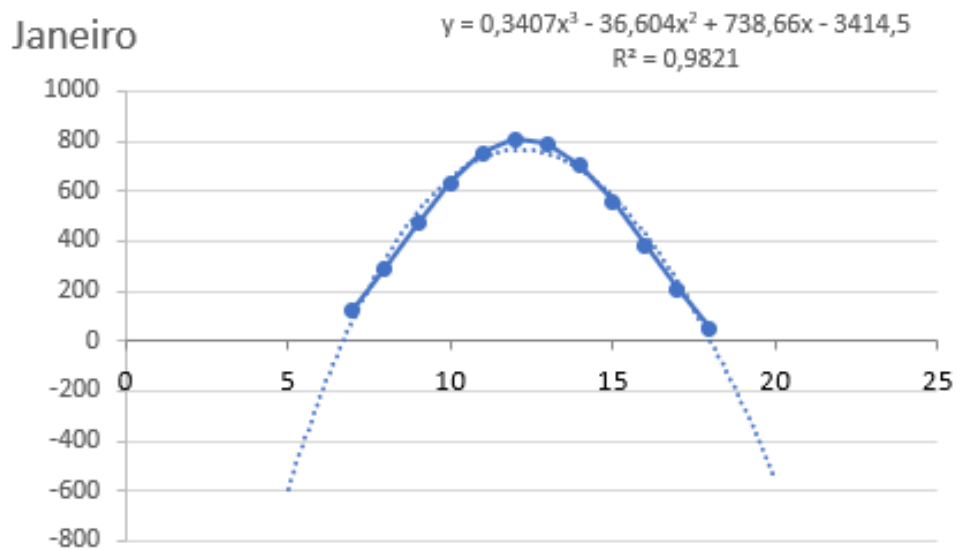


Figura 11-Regressão Polinomial de 4º ordem da radiação para o mês de Janeiro em Recife

Da Figura 11 temos que a equação média da incidência de calor no mês de janeiro para Recife será a equação (1).

$$G = 0,3407t^3 - 36,604t^2 + 738,66t - 3414,5 \quad (1)$$

Onde  $t$  será o tempo em horas correspondente a um dia inteiro.

### 4.3 MODULO PV/T

A célula fotovoltaica térmica foi modelada para equações globais que determinam a quantidade de calor gerada pelo sistema, a energia elétrica gerada pelo

sistema e a temperatura da água quente para o termo acumulador. Respectivamente temos as equações 2; 3 e 4

$$\dot{Q}_{PV/T} = \eta_t G A_{PV/T} N_p \quad (2)$$

$$\dot{W}_{PV/T} = \eta_e G A_{PV/T} N_p \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{PV/T} = Vazão_{águaquente} cp_{águaquente} (T_{entrada} - T_{saida}) \quad (4)$$

Sendo que temos na equação 2  $\eta_t$ ,  $G$ ,  $A_{PV/T}$ ,  $N_p$  que respectivamente representam. A eficiência térmica que segundo Solener, 2011 é de 0,094 o valor da radiação solar calculada na equação 1, Área de uma célula fotovoltaica e o número de coletores solares utilizados.

Já para equação 3 temos a eficiência elétrica que é representada por  $\eta_e$ . E na equação 4 temos  $Vazão_{águaquente}$ ,  $cp_{águaquente}$ ,  $T_{entrada}$  e  $T_{saida}$  respectivamente a vazão de água que passa pelo sistema, o calor específico da água na temperatura máxima do sistema, a temperatura de entrada da água no sistema PV/T e a temperatura de saída do sistema de coletores PV/T que também é a temperatura da água que entra no tanque de termoacumulação.

#### **4.4 TANQUE DE TERMOACUMULAÇÃO**

Em razão da variação transiente diária e sazonalmente da radiação solar, o fluxo de calor no sistema PV/T que alimenta o chiller por absorção se torna inconstante. Para termos um sistema que atue de forma contínua e uniforme durante um ano é preciso de um tanque de termoacumulação, cujo os parâmetros podem ser vistos na tabela 3.

Fonte: Soares, 2021

Espessura do isolamento	0,05 m
Comprimento	1,0
Diâmetro interno	0,62
Condutividade térmica	0,037 W/mK
Massa específica	64 kg/m <sup>3</sup>

Tabela 3-Dados Tanque Termoacumulador

Realizando o balanceamento de energia para o termoacumulador obtemos a equação 5.

$$(mc)_{at} (T_{entrada_{tanque}} - T_{saida_{tanque}}) = Q_e + Q_s + Q_p \quad (5)$$

Onde os termos no lado esquerdo da equação com os subscritos *at* são referentes a água que está dentro do termo acumulador, já  $T_{entrada_{tanque}}$  é a temperatura da água que entra no tanque vindo do sistema PV/T e já  $T_{saida_{tanque}}$  é a temperatura que sair do tanque para alimentar o chiller de absorção. No lado direito da equação temos os fluxos de calor no tanque,  $Q_e$  corresponde ao calor adicionado no tanque pelo coletor PV/T,  $Q_s$  é o fluxo de calor que alimenta o chiller por absorção e por último  $Q_p$  que se trata calor que é trocado com o ambiente.

A primeira parcela do fluxo de calor pode ser determinada pela equação 6.

$$Q_e = m_{water} C_{water} (T_{entrada_{tanque}} - T_{média_{tanque}}) \quad (6)$$

Em que  $T_{média_{tanque}}$  é a temperatura média da água dentro do tanque. A segunda parcela do fluxo de calor pode ser calculada pela equação 7.

$$Q_s = m_{water} C_{water} (T_{entrada_{tanque}} - T_{alimentação_{chiller}}) \quad (7)$$

Em que  $T_{retorno}$  é a temperatura da água retornando para o termo-acumulador. A última parcela de calor é a troca de calor do tanque com o ambiente que pode ser obtida pela equação 8.

$$Q_p = U_p A \quad (8)$$

Onde o  $U_p$  o coeficiente de transferência de calor global, que é apresentado pela equação 9 (HU et al., 2020).

$$U_p = \frac{1}{\frac{D_{et}}{2k_t} \ln \left( \frac{D_{et}}{D} + \frac{1}{h_{a-t}} \right)} \quad (9)$$

Em que temos  $D_{et}$ ,  $k_t$  e  $D$  é o diâmetro externo do tanque, a condutividade térmica do tanque e o diâmetro interno do tanque. Já o  $h_{a-t}$  é o coeficiente convectivo entre o tanque e o ambiente.

Para se obter o coeficiente convectivo é preciso calcular o número de nusselt para um cilindro vertical, que pode ser encontrada pela equação 10 (BERGMAN et al., 2014).

$$Nu = 0,68 + \frac{0,67Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad \text{onde } Ra_L \leq 10^9 \quad (10)$$

#### 4.5 CHILLER POR ABSORÇÃO

O ciclo analisado neste estudo é constituído por placas PV/T. O sistema de coletores solares gera água quente, que é conectada ao gerador do chiller de absorção. O chiller utiliza brometo de lítio e nitrato de amônia como fluido de trabalho, com uma capacidade térmica de 3 TR. A configuração do sistema é apresentada esquematicamente na Figura 12. Observamos que a água quente gerada pelas placas PV/T é armazenada em um tanque termoacumulador, o qual tem a função de mitigar a variabilidade na geração de água quente pelo sistema, que depende da radiação solar como fonte de energia. Isso permite manter uma temperatura adequada de alimentação ao gerador. Vale ressaltar que o modelo utilizado foi uma simplificação, embora baseado em um modelo mais avançado e realístico descrito em Lima, 2021.

Fonte: O Autor.

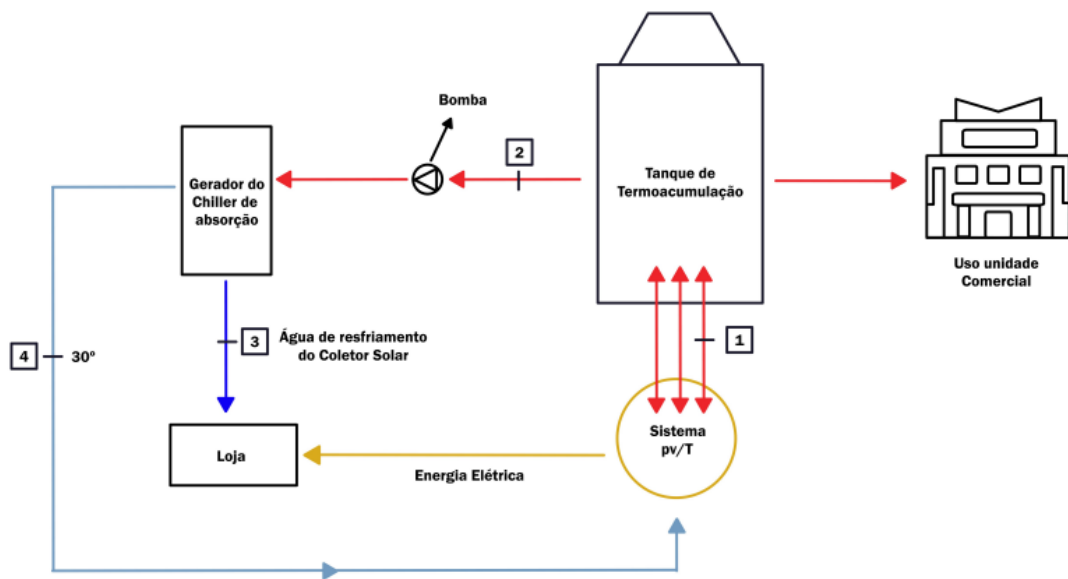


Figura 12-Sistema PV/T integrado com o chiller por absorção.

A energia elétrica gerada pelo sistema de coletores solar segue para o sistema principal de energia do empreendimento colaborando para uma diminuição do consumo de energia vinda da concessionária, e o resto da água quente não utilizada para alimentar o chiller segue para abastecer o refeitório do empreendimento. Para criação do modelo foi necessário impor algumas restrições e simplificações no sistema do chiller Figura 13 (Lima, 2021), sendo elas listadas abaixo:

- Chiller funciona em regime permanente;
- Não há perda de calor dos componentes com o ambiente externo;
- Não é observado perda de pressão e calor nas tubulações;
- Válvulas de expansão são isentálpicas;
- O ciclo de resfriamento do absorvedor e do condensador estão posicionados em série;
- Apenas o fluido refrigerante está circulando no condensador e evaporador;
- O sistema possui apenas dois níveis de pressão;
- Não é observado variação significativa na energia potencial e cinética do sistema;

Fonte: Lima, (2021).

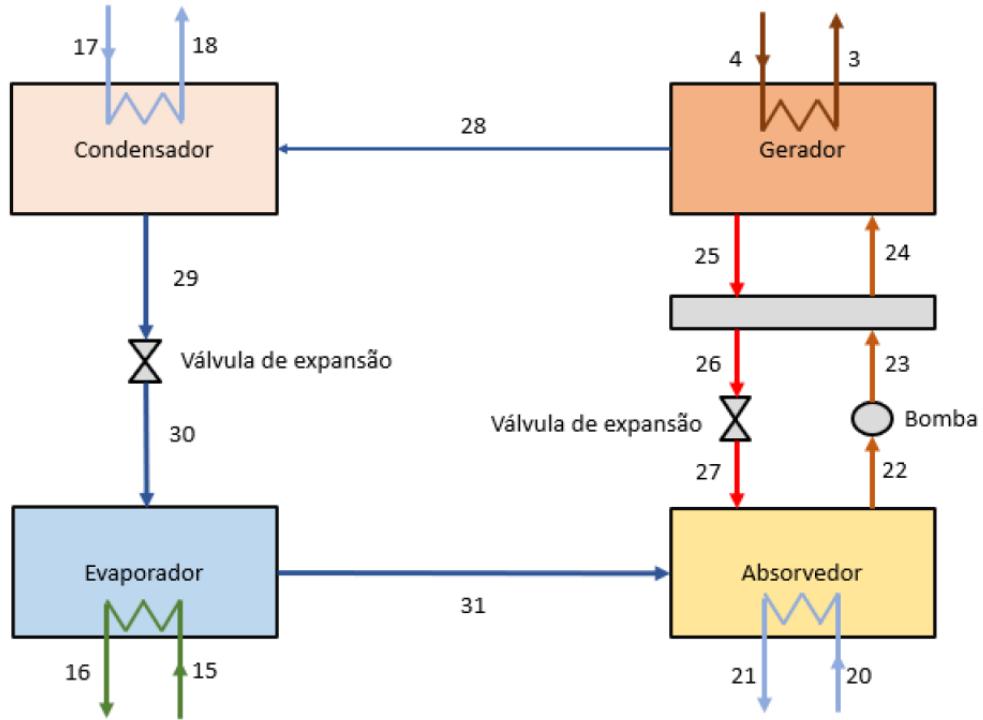


Figura 13-Modelo do chiller de absorção utilizado.

Aplicando o balanço de energia nesse sistema temos, a seguinte equação 11.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}h \quad (11)$$

Para cada componente individual temos um trocador calor interno cujo o fluxo de calor será melhor abordado utilizando a abordagem de Herold, Radermacher e Klein (2016, que nos dá a equação 12.

$$\dot{Q} = UA \frac{(T_{h,1} - T_{c,1}) - (T_{h,2} - T_{c,2})}{\ln \frac{T_{h,1} - T_{c,1}}{T_{h,2} - T_{c,2}}} \quad (12)$$

A próxima equação necessária é a conservação da massa no sistema, onde a vazão mássica saindo e entrando em um volume de controle deve ser a mesma, equação 13.

$$\sum m_e = \sum m_s \quad (13)$$

E por último temos que usar a lei da conservação das espécies aplicado no gerador e no absorvedor para determinar as concentrações de nitrato de amônia e brometo de lítio nas soluções rica e pobre, equação 14.

$$\sum m_e x_e = \sum m_s x_s \quad (14)$$

As equações serão utilizadas em cada componente do chiller de absorção.

#### 4.5.1 GERADOR

O gerador será o primeiro componente analisado Figura 14. O balanço de massa será aplicado no circuito externo (Linha 3-4) e no interno (Linha 24-25 e 28), conforme as equações 15 e 16.

Fonte: Lima, (2021).

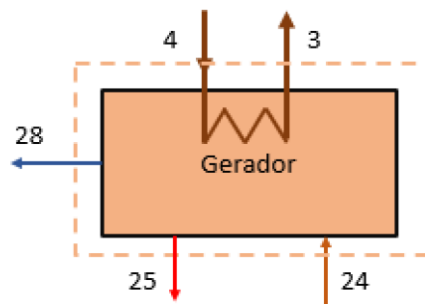


Figura 14-Fluxos mássicos e de calor no Gerador

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (15)$$

$$\dot{m}_{25} + \dot{m}_{28} = \dot{m}_{24} \quad (16)$$

Após o balanço de massa será feito o balanço das espécies no gerador, equação 17.

$$\dot{m}_{25}x_{25} = \dot{m}_{24}x_{24} \quad (17)$$

Já o balanço de energia no gerador para os circuito interno e externo, é calculado nas seguintes equações 18; 19 e 20.

$$Q_{ger} = \dot{m}_{24}h_{24} - (\dot{m}_{25}h_{25} + \dot{m}_{28}h_{28}) \quad (18)$$

$$Q_{ger} = \dot{m}_4h_4 - \dot{m}_3h_3 \quad (19)$$

$$Q_{ger} = UA_{ger} \frac{(T_4 - T_{25}) - (T_3 - T_{28})}{\ln \frac{T_4 - T_{25}}{T_3 - T_{28}}} \quad (20)$$

#### 4.5.2 ABSORVEDOR

O segundo componente do chiller de absorção é o absorvedor Figura 15. O balanço de massa será aplicado no circuito externo (Linha 20-21) e no interno (Linha 22-27 e 31), conforme as equações 21 e 22.

Fonte: Lima, (2021).

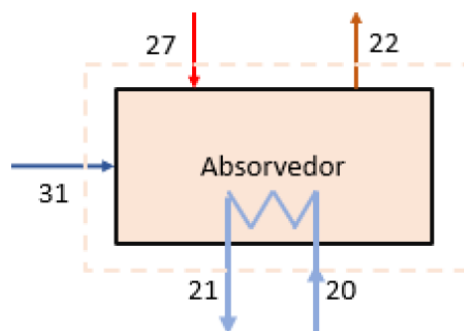


Figura 15-Fluxos mássicos e de calor no Absorvedor

$$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{21} \quad (21)$$

$$\dot{m}_{31} + \dot{m}_{27} = \dot{m}_{22} \quad (22)$$

Já o balanço de energia no Absorvedor para os circuito interno e externo, é calculado nas seguintes equações 23; 24 e 25.

$$Q_{|a|} = (\dot{m}_{31}h_{31} + \dot{m}_{27}h_{27}) - \dot{m}_{22}h_{22} \quad (23)$$

$$Q_{|a|} = \dot{m}_{27}h_{27} - \dot{m}_{22}h_{22} \quad (24)$$

$$Q_{|a|} = UA_{|a|} \frac{(T_4 - T_{27}) - (T_3 - T_{28})}{\ln \frac{T_4 - T_{27}}{T_3 - T_{28}}} \quad (25)$$



### 4.5.3 TROCADOR DE CALOR

O terceiro componente do chiller de absorção é o trocador de calor da solução 16. O balanço de massa será aplicado no circuito de solução rica (Linha 23-24) e pobre (Linha 25-26), conforme as equações 26 e 27.

Fonte: Lima, (2021).

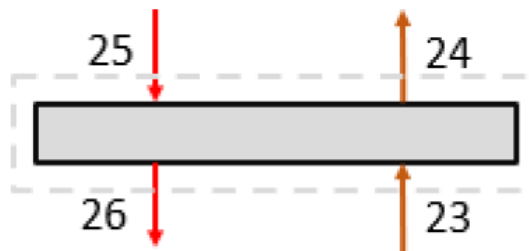


Figura 16-Fluxos mássicos e de calor no trocador de calor

$$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{24} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{26} \quad (27)$$

Já o balanço de energia no trocador de calor para as soluções rica e pobre, temos respectivamente as seguintes equações 28; 29 e 30. Mas além do balanço da energia para calcular o fluxo de calor precisamos de uma informação extra dada pela efetividade do trocador, que pode ser calcula pela equação 31.

$$Q_{TC} = \dot{m}_{23}h_{23} - \dot{m}_{24}h_{24} \quad (28)$$

$$Q_{TC} = \dot{m}_{25}h_{25} - \dot{m}_{26}h_{26} \quad (29)$$

$$Q_{TC} = UA_{TC} \frac{(T_{25}-T_{24})-(T_{26}-T_{23})}{\ln \frac{T_{25}-T_{24}}{T_{26}-T_{23}}} \quad (30)$$

$$\varepsilon = \frac{T_{25}-T_{24}}{T_{26}-T_{23}} \quad (31)$$

#### 4.5.4 BOMBA

O quarto componente do chiller de absorção é a bomba figura 17. O balanço de massa aplicado na bomba nos dá a equação 32.

Fonte: Lima, (2021).

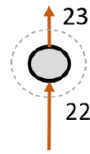


Figura 17-Fluxos mássicos na bomba

$$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{22} \quad (32)$$

Já o balanço de energia na bomba é calculado nas seguintes equações 33 e 34.

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_{22}(h_{23} - h_{22}) \quad (33)$$

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}_{22}V_{22}(P_{23} - P_{22}) \quad (34)$$

#### 4.5.5 CONDENSADOR

O quinto componente do chiller de absorção é o condensador 18. O balanço de massa será aplicado no circuito externo (Linha 17-18) e no interno (Linha 28-29), conforme as equações 35 e 36.

Fonte: Lima, (2021).

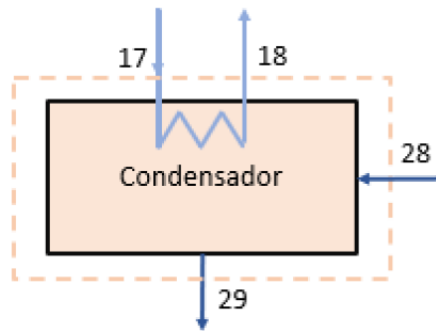


Figura 18-Fluxos mássicos e de calor no condensador

$$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} \quad (35)$$

$$\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29} \quad (36)$$

Já o balanço de energia no condensador para os circuito interno e externo, é calculado nas seguintes equações 37; 38 e 39.

$$Q_{cond} = \dot{m}_{17}h_{17} - \dot{m}_{18}h_{18} \quad (37)$$

$$Q_{cond} = \dot{m}_{28}h_{28} - \dot{m}_{29}h_{29} \quad (38)$$

$$Q_{cond} = UA_{cond} \frac{(T_{29}-T_{17})-(T_{29}-T_{18})}{\ln \frac{T_{29}-T_{17}}{T_{29}-T_{18}}} \quad (39)$$

#### 4.5.6 VÁLVULAS DE EXPANSÃO

O sexto componente do chiller de absorção é as válvulas de expansão 19. Que foram simplificas para trabalharem de maneira isentálpicas nesse o modelo.

Fonte: Lima, (2021).

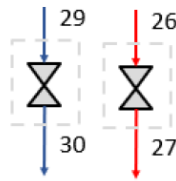


Figura 19-Fluxos mássicos nas Válvulas

#### 4.5.7 EVAPORADOR

O sétimo componente do chiller de absorção é o evaporador 20. O balanço de massa será aplicado no circuito externo (Linha 15-16) e no interno (Linha 30-31), conforme as equações 40 e 41.

Fonte: Lima, (2021).

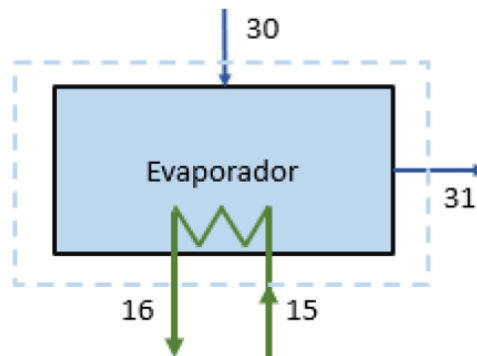


Figura 20-Fluxos mássicos e de calor no Evaporador

$$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} \quad (40)$$

$$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31} \quad (41)$$

Já o balanço de energia no evaporador para os circuito interno e externo, é calculado nas seguintes equações 42; 43 e 44.

$$Q_{eva} = \dot{m}_{15}h_{15} - \dot{m}_{16}h_{16} \quad (42)$$

$$Q_{eva} = \dot{m}_{30}h_{30} - \dot{m}_{31}h_{31} \quad (43)$$

$$Q_{eva} = UA_{eva} \frac{(T_{16}-T_{31})-(T_{15}-T_{31})}{\ln \frac{T_{16}-T_{31}}{T_{15}-T_{31}}} \quad (44)$$

#### 4.6 CARGA TÉRMICA

Os valores da carga térmica da loja climatizada foram determinados com base no modelo descrito na NBR 16401 junto com informações coletadas da planta baixa do empreendimento conforme Figura 21.

Fonte: Autor

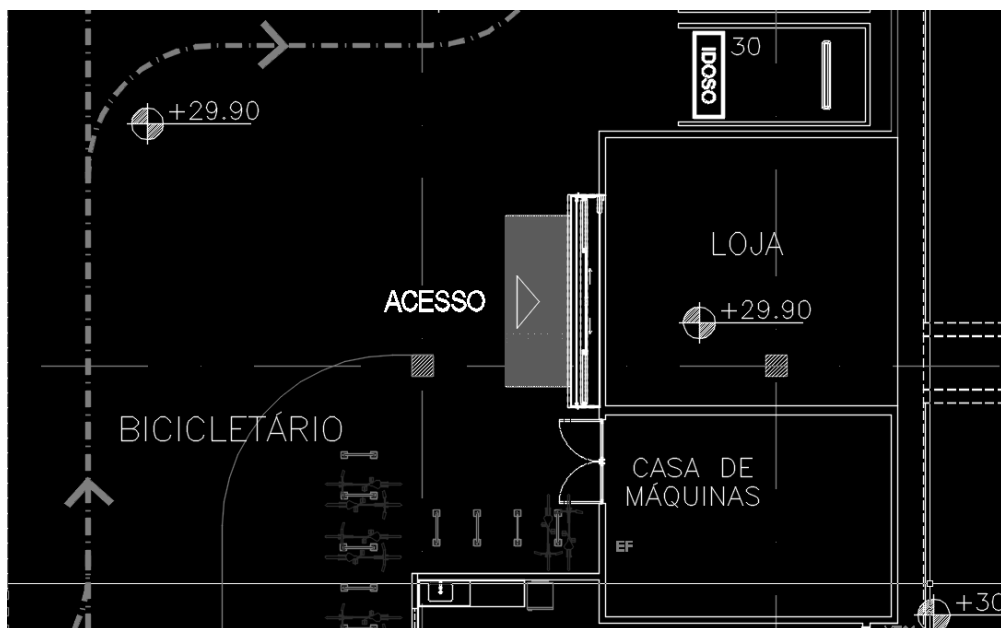


Figura 21 - Planta baixa do espaço climatizado

Com os parâmetros de carga térmica do espaço climatizado, foi-se utilizado o software HAP da Carrier para se calcular carga térmica máxima durante um ano com os parâmetros de 22° graus e 55% de umidade relativa do ar para se obter um bom conforto térmico.

## 5 RESULTADOS E ANALISE

Neste t3pico vamos apresentar o estudo de caso no qual o modelo foi aplicado e os resultados obtidos pelo modelo criado e discutir o comportamento do modelo de acordo com a temperatura de entrada de 3gua quente no gerador, fluxos de calor e energia gerada pelas placas PV/T m3s a m3s.

### 5.1 CARGAS T3RMICAS

O levantamento dos par3metros de carga t3rmica do ambiente climatizado pela an3lise da planta baixa e conforme a NBR 16401, nos d3 a tabela 4 que servira de par3metros de entrada para o software HAP calcular o valor pico de calor m3s a m3s do espaço climatizado.

Tabela 4-Levantamento de cargas t3rmicas

3rea de piso	14,1 m <sup>2</sup>
3rea de parede externa	16,0 m <sup>2</sup>
3rea de parede com ambiente n3o climatizado	11,0 m <sup>2</sup>
Iluminaç3o e Equipamentos el3tricos	1.128 W
Ocupaç3o do ambiente	5 pessoas/m <sup>2</sup>
Atividade da ocupaç3o (Calor sens3vel/Calor latente)	(75 W/ 45W)
Fator de Segurança	10%

Fonte: Autor

Com os dados da tabela 4 determinados utilizaremos eles como par3metro de entrada para o HAP calcular o valor de calor necess3rio para manter o ambiente em conforto t3rmico, Figura 22.

Fonte: Autor

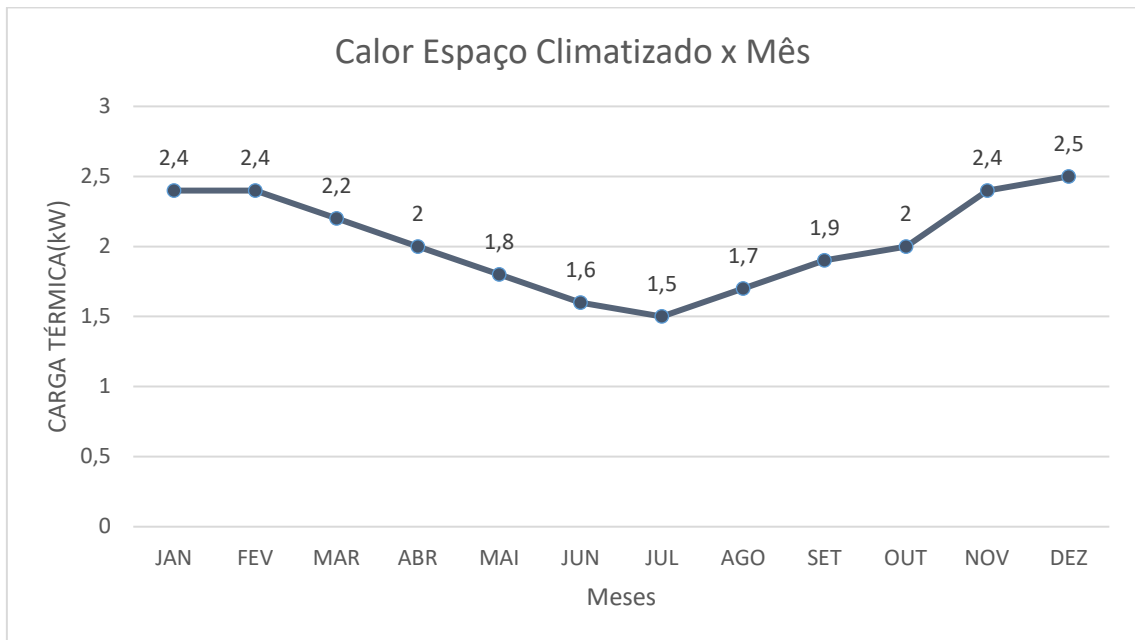


Figura 22-Calor para climatizar o espaço proposto.

É possível observar na Figura 22 que temos um pico de calor necessário para climatizar o ambiente em dezembro que corresponde a 2,5 kW. Logo o chiller de absorção deve fornecer ser capaz de fornecer no mínimo essa quantidade de calor frio para climatizar esse ambiente, caso ao contrário o chiller selecionado não poderá ser utilizado para essa aplicação.

## 5.2 SISTEMA PV/T

Os resultados obtidos para o calor e energia elétrica gerado pelo sistema PV/T junto com a temperatura da água que alimenta o tanque de termo acumulação foram determinados utilizando as equações globais previamente explicadas e foi utilizado o *Engineering Equation Solver* (EES) para simular o modelo, os resultados podem ser vistos abaixo no gráfico 23 e 24 respectivamente.

Fonte: O Autor.

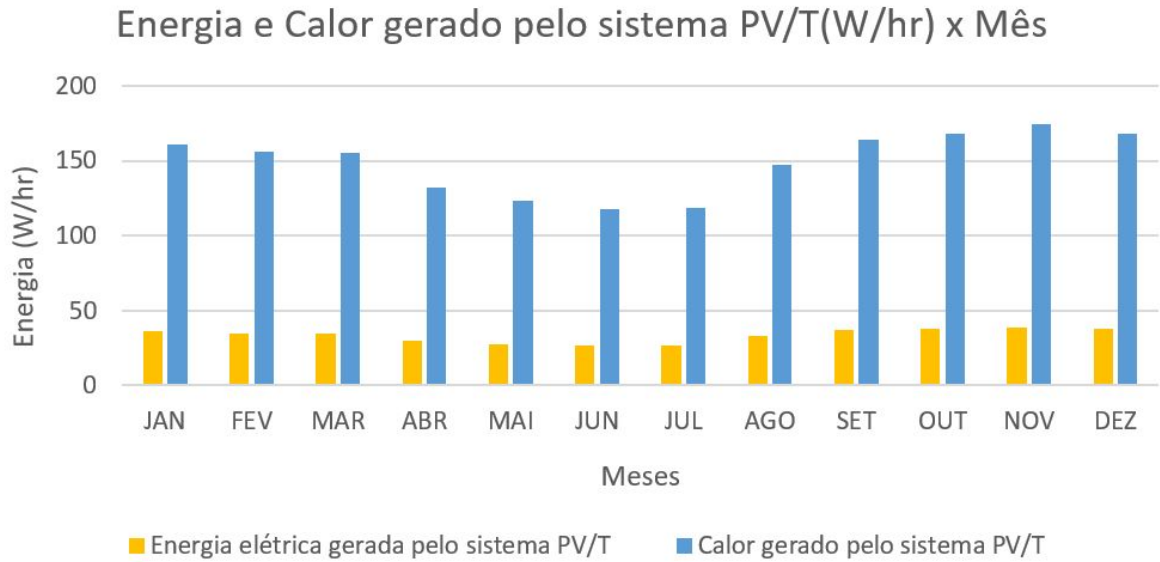


Figura 23-Energia elétrica e Calor gerado pelo sistema PV/T.

Fonte: O Autor

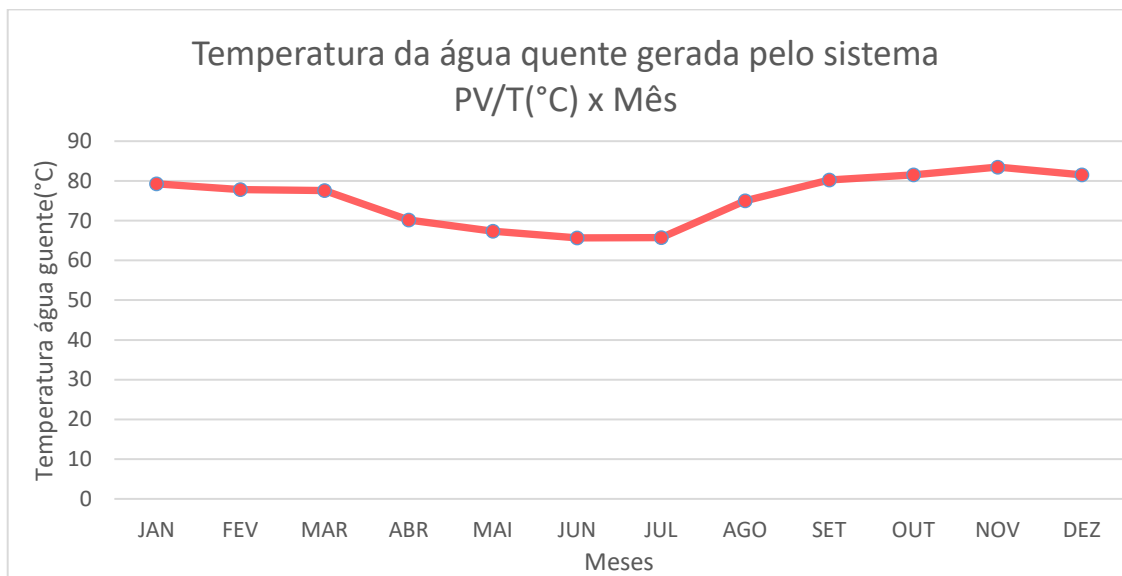


Figura 24-Temperatura da água quente gerada pelo sistema PV/T.

Observando os resultados obtidos nos gráficos 23 notamos que a placa simulada gera no seu pico ao redor de 170 W/hr em média para o mês de novembro e por volta de 39,05 W/hr em média de energia elétrica para o mesmo mês. Já a temperatura de água quente gerada pelo sistema tem o seu pico de 83,49° em novembro com uma média anual de 75,44°C durante o ano.



### 5.3 CHILLER

No chiller de absorção vamos focar nos resultados para o calor que chegar no gerador vindo do tanque termo acumulador, o calor do evaporador que vai ser o parâmetro determinante se o modelo empregado pode ser usado para climatizar o ambiente proposto e por fim o calor do calor do condensador que nos permitirá observa se o chiller se comportará de uma maneira apropriada. Os resultados gerados pelo modelo desenvolvido podem ser vistos nos gráficos 25 e 26.

Fonte: O autor.

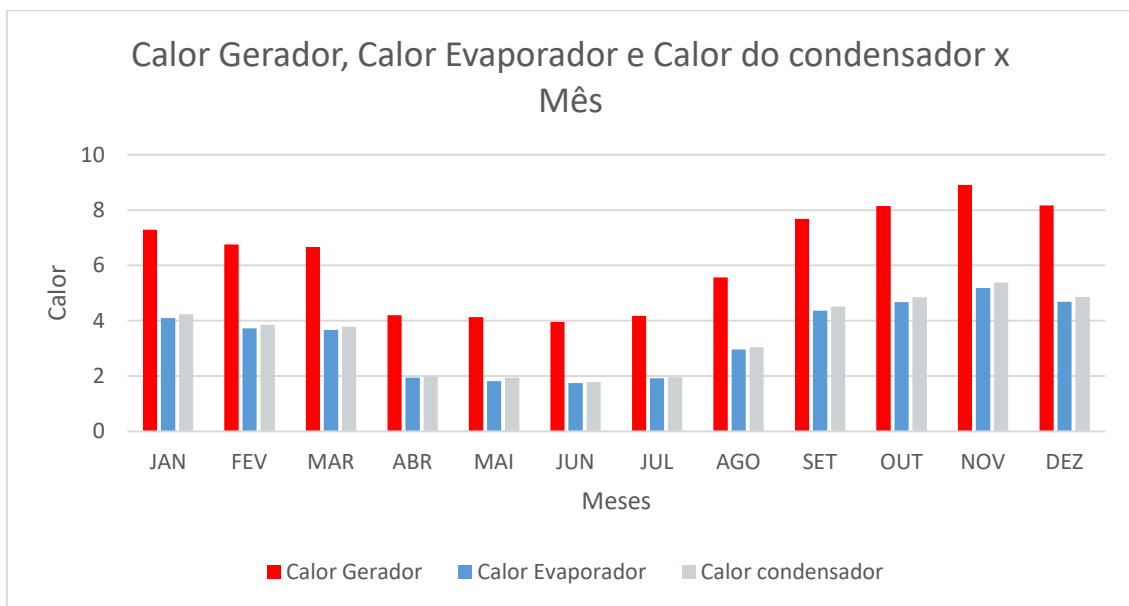


Figura 25-Calor no Gerador, Evaporador e Condensador do chiller.

Fonte o autor

## Carga Térmica e o Calor gerado pelo evaporador x Mês

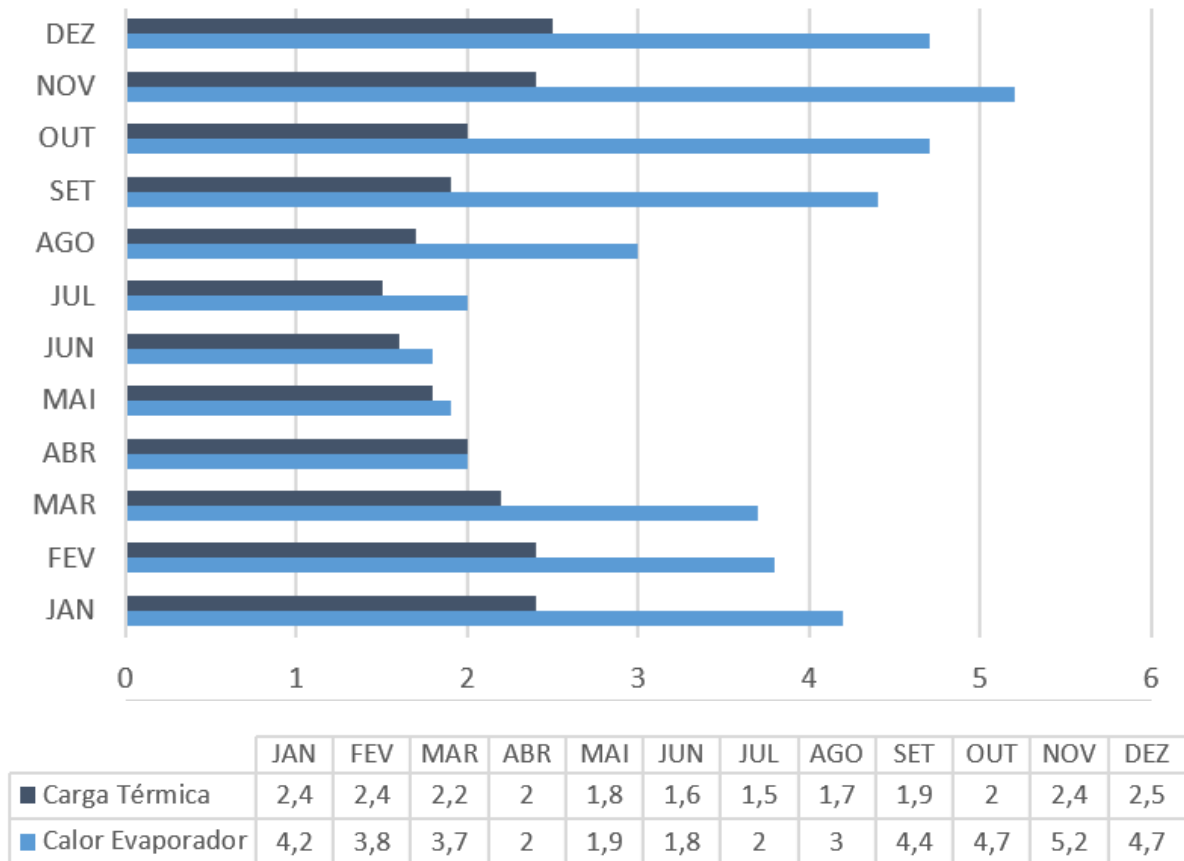


Figura 26 -Carga térmica e o calor frio gerado no evaporador.

Os resultados do modelo para o chiller de absorção que utiliza NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> como fluido de trabalho mostra um cenário bem interessante. Observa-se primeiramente na figura 25 que o pico de calor que é calor transferido para o gerador do tanque de termo acumulação atinge seu pico em novembro assim como a temperatura da água quente e o calor gerado pelo sistema PV/T atingem seu máximo valor.

Na figura 26 tem-se a carga térmica do ambiente climatizado e a carga de água gelada (capacidade frigorífica) gerado pelo evaporador mês a mês. Através da análise desses obtidos, pode ser inferir que o chiller proposto no modelo consegue atender a demanda de frio adequada, já que a quantidade de calor frio é suficiente para

climatizar o ambiente proposto com as condições de conforto preestabelecidas na norma, com valores de 22°C e 55% de temperatura e umidade relativa, respectivamente. Além disso, é possível observar que nos meses de Abril e Maio o calor frio gerado pelo evaporador (capacidade frigorífica) não fornece suficiente frio de climatização para atender demandas de picos inesperados gerados pelas pessoas no ambiente, o que pode levar a condições de conforto não adequadas segundo a norma.

## **6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

Para se obter um bom conhecimento nos sistemas de climatização por absorção que utilizam o  $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ , é necessário revisar o vasto material já publicado e realizar estudo de casos para avaliar a sua possível aplicação real. Neste trabalho realizou-se o desenvolvimento e análise de um modelo para a interligação de um sistema de geração de energia elétrica e água gelada de climatização através de coletores solar com um chiller por absorção, com o intuito de verificar se tal abordagem seria viável para climatizar o ambiente proposto.

A modelagem e simulação do sistema PV/T e do chiller de absorção foram realizadas no EES utilizando uma abordagem de equações globais para o sistema PV/T e para o chiller de absorção utilizando o amônia/nitrato de lítio como fluido de trabalho foi realizada uma abordagem utilizando as equações características desse chiller. A carga térmica máxima calculada para o espaço a ser climatizado é de 2,5 kW durante o mês de dezembro no mesmo o chiller de absorção gera por volta de 4,7 kW de calor frio, sendo suficiente para climatizar o ambiente e o sistema PV/T fornece cerca de 37,66W/hr durante esse mesmo mês. Os resultados obtidos pela metodologia aplicada demonstraram uma relativa aderência com os resultados vistos em outros estudos que utilizam o  $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$  e o mesmo foi observado para o modelo utilizado para as células PV/T.

Os gráficos gerados pelo modelo utilizado demonstram a faixa de aplicabilidade do sistema PV/T para geração de calor de alimentação para um chiller de absorção no caso proposto, também demonstra a sua limitação especialmente durante os meses onde a incidência de radiação é menor, devido a essa sazonalidade da radiação solar o sistema poderia ser complementado por um grupo motor-gerador que utilize biodiesel como combustível de maneira a aliviar os efeitos da sazonalidade observada no modelo.

### **6.1 TRABALHOS FUTUROS**

Outro trabalho futuro que possa complementar essa linha de pesquisa seria adicionar outras rotinas no EES para se calcular os parâmetros para o dimensionamento das tubulações e componentes necessários para execução do

projeto, também poderia se adicionar rotinas para calcular a viabilidade econômica da execução do projeto.

Uma futura pesquisa poderia aperfeiçoar a abordagem feita neste trabalho por meio da utilização de equações transientes unidimensionais a partir do modelo das diferenças finitas que possam gerar resultados mais precisos para esse estudo de caso.

## REFERENCIAS

Acuña, A. et al. Optimum generator temperature to couple different diffusion absorption solar cooling systems. *International Journal Of Refrigeration*, [s.l.], v. 45, p.128-135, set. 2016. Elsevier BV.

Akrami, E., Nemati, A., Nami, H., Ranibar, F. Exergy and exergoeconomic assessment of hydrogen and cooling production from concentrated PVT equipped with PEM electrolyzer and LiBr-H<sub>2</sub>O absorption chiller, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 622-633 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.007>

Alcântara, S.C.S., Ochoa, A.A.V., Costa, J.A.P., Michima, P.S.A. and Silva, H.C.N. 'Natural gas based trigeneration system proposal to an ice cream factory: an energetic and economic assessment', *Energy Conversion and Management*, Vol. 197, 2019, pp.100165, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100165>.

Alcântara, S.C.S., Lima, A.A.S.; Ochoa, A.A.V.; Leite, G.d.N.P.; Costa, J.A.P.d; Santos, C.A.C.d.Cavalcanti, E.J.C. Michima, P.S.A. Implementation of the characteristic equation method in quasi-dynamic simulation of absorption chillers: Modeling, validation and first results. *Energij conversion and management*, 2022, 13, <https://doi.org/10.3390/en14010048>.

Bhattarai, S. et al. Simulation and model validation of sheet and tube type photovoltaic thermal solar system and conventional solar collecting system in transient states. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 103, p. 184–193, 2012.

Chow, T. T. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, v. 87, n. 2, p. 365–379, 2010.

Duffie, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. quarta ed. New Jersey: Wiley, 2013. v. 20.

Ferreira, Stanley Primo. Análise termodinâmica de um sistema de refrigeração por absorção de vapor com dessorção do refrigerante por energia solar. 2018. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, 2018.

Fonseca Júnior, José de Araujo. Metodologia experimental para estudo da transferência de calor e massa no processo de absorção do vapor d'água por filmes verticais descendentes de água-brometo de lítio. 2013. Dissertação (mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

Giorgio. Romano; MATTIA de Rosa; CECILIA, Rossi; FEDERICO, Scarpa; TAGLIAFICO, A. Luca. Dynamic thermal model for hybrid photovoltaic panels. AugERE Team, DIME/TEC - Division of Thermal Energy and Environmental Conditioning, University of Genoa ViaAll'Opera Pia 15/A, 16145, Genoa, Italy. *Energy Procedia* Pg.345 –353, (2015).

Guido, Walter Hüls, et al. Performance of absorption chillers in field tests. *Applied Thermal Engineering*, v. 134, p. 353-359, 2018.

Herold, K. E.; Radermacher, R.; KLEIN, S. A. *Applications of Absorption Chillers and Heat Pumps*. [s.l: s.n.].

Hu, M. et al. A parametric study on the performance characteristics of an evacuated flat-plate photovoltaic/thermal (PV/T) collector. *Renewable Energy*, n. xxxx, 2020.

Lima, A. A. S. et al. Energetic analysis of an absorption chiller using NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub> as an alternative working fluid. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 36, n. 2, p. 1061–1073, 2019.

Lima, A. A. S. Análise energética de um sistema fotovoltaico/térmico e sua integração a uma unidade de poli geração. Tese Doutorado – UFPB, João Pessoa, 2021.

Lima, Thiago., Dutra, Jose Carlos., Primo, Ana Rosa., Rohatgi, Janardan., Ochoa, Alvaro A., Solar water heating for a hospital laundry: A case study. Solar Energy, vol 122, pp. 737-748, 2015.

Moreira, José Roberto Simões. Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética. 1º Edição, Rio de Janeiro. LTC. 2017.

Nizetic, S.; Coko, D.; Yadav, A.; Grubsic- CABO, F. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response. Department of Thermodynamics and Heat Engines, University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Laboratory for Thermodynamics and Energy Efficiency, R. Boskovicica 32, 21000 Split, Croatia. Energy Conversion and Management, Pg.287–296, 2016.

Ochoa, Alvaro A. Villa; Dutra C., J. ; Guerreiro, J. H. . Energy and Exergy Analysis of the Performance of 10 TR Lithium Bromide/Water Absorption Chiller. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia **JCR**, v. 37, p. 38-47, 2014.

Ochoa, Alvaro A. Villa. ANÁLISE EXERGUECONÔMICA DE UM CHILLER DE ABSORÇÃO DE 10TR INTEGRADO A UM SISTEMA DE MICROGERAÇÃO COM MICROTURBINA A GÁS DE 30 KW. [s.l.] UFPE, 2010.

Rejet, O., Dhaou, H., & Jemni, A. A numerical investigation of a photovoltaic thermal (PV/T) collector. Renewable Energy, vol. 77, pp. 43-50, 2015.

Ventas, R., Lecuona, A., Rodriguez-Hidalgo, M.C. Performance analysis of an absorption double-effect cycle for power and cold generation using ammonia/lithium nitrate, Applied Thermal Engineering, 115, 256-266 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.102>