

ESTUDO DE UM REFRIGERADOR POR ADSORÇÃO EM CICLO CONTÍNUO PARA REFRIGERAÇÃO DE EDIFICAÇÕES

HENRIQUE THOMÁZ DE CARVALHO

Rio Verde, GO

2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DE UM REFRIGERADOR POR ADSORÇÃO EM CICLO
CONTÍNUO PARA REFRIGERAÇÃO DE EDIFICAÇÕES**

HENRIQUE THOMÁZ DE CARVALHO

Trabalho de Curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Campus Rio
Verde, como requisito parcial para obtenção
do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Hugo Leonardo Souza Lara Leão

Rio Verde - GO

Março, 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF
Goiano - SIBi**

C331 Thomaz de Carvalho, Henrique
Estudo de um Refrigerador por Adsorção em Ciclo
Contínuo para Refrigeração de Edificações / Henrique
Thomaz de Carvalho. Rio Verde 2025.

35f. il.

Orientador: Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leao.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de
0220084 - Bacharelado em Engenharia Civil - Integral - Rio
Verde (Campus Rio Verde).

1. Engenharia Civil. 2. Energia Renovável. 3. Sustentabilidade.
4. Eficiência. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: | |

Nome Completo do Autor: Henrique Thomaz de Carvalho

Matrícula: 2017102200840186

Título do Trabalho: Estudo de Refrigerador por Adsorção em Ciclo Contínuo para Refrigeração de Edificações

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 18/03/2025

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde - GO, 18/03/2025.

Henrique Thomaz de Carvalho

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 23/2025 - GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 14 dias do mês de março de dois mil e vinte e cinco, às 15:30h horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Dr. Hugo Leonardo Souza Lara Leão (orientador), Prof. Dr. Luís Henrique da Silva Ignacio (membro interno) e Prof. Dr. Rogério Favareto (membro interno), para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “Estudo de um Refrigerador por Adsorção em Ciclo Contínuo para Refrigeração de Edificações” de Henrique Thomaz de Carvalho, estudante do curso de Engenharia Civil do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2017102200840186. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Hugo Leonardo Souza Lara Leão

Orientador(a)

(Assinado Eletronicamente)

Rogério Favareto

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Luís Henrique da Silva Ignacio

Membro

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Hugo Leonardo Souza Lara Leao, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 16/03/2025 17:04:39.
- **Rogério Favareto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 16/03/2025 18:34:22.
- **Luis Henrique da Silva Ignacio, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 17/03/2025 13:01:05.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 16/03/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 687281

Código de Autenticação: 87f6bb38ea



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

HENRIQUE THOMÁZ DE CARVALHO

ESTUDO DE UM REFRIGERADOR SOLAR POR ADSORÇÃO EM CICLO CONTÍNUO PARA REFRIGERAÇÃO DE EDIFICAÇÕES

Trabalho de Curso DEFENDIDO e APROVADO em 14 de março de 2025, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

Hugo Leonardo Souza Lara Leão
Prof. Dr.
Instituto Federal Goiano -
campus Rio Verde

Rogério Favareto
Prof. Dr.
Instituto Federal Goiano -
campus Rio Verde

Luís Henrique da Silva Ignacio
Prof. Dr.
Instituto Federal Goiano -
campus Rio Verde

Rio Verde - GO
Março, 2025

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal validar uma alternativa sustentável ao tradicional sistema de refrigeração por compressão a vapor através de uma simulação. Analisou-se um refrigerador por adsorção operando em ciclo contínuo com os seguintes componentes: adsorvedor, dessorvedor, condensador, evaporador e coletor solar. O par adsortivo adotado para o refrigerador é a sílica gel-água. A eficácia e a aplicabilidade do equipamento foram avaliadas com base em dados obtidos por modelagem térmica, permitindo o dimensionamento de um refrigerador por adsorção equivalente a um sistema de compressão de 12 mil BTUs, com coeficiente de performance de 1,00. Assim, o estudo evidencia uma perspectiva inovadora e sustentável para o setor, ressaltando a importância de alternativas ambientalmente conscientes para atender às demandas da sociedade contemporânea.

Palavras-chave: energia renovável, sustentabilidade, eficiência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução dos investimentos em eficiência energética	9
Figura 2: Posse e consumo médio anual por equipamento.	10
Figura 3: Diagrama de refrigerador por adsorção em ciclo contínuo.	12
Figura 4: comparação da temperatura média da cama de adsorção entre experimental e modelagem na fase de adsorção.	14
Figura 5: Comparação da temperatura média da cama de adsorção entre experimental e modelagem na fase de adsorção.	14
Figura 6: Variação de temperatura de um ciclo do refrigerador - comparação entre experimento e simulação MATLAB.	17
Figura 7: Variação de temperatura de um ciclo do refrigerador - comparação entre experimento e simulação MATLAB.	18
Figura 8: Variação do COP de um ciclo do refrigerador - comparação entre experimento e simulação MATLAB.	18
Figura 9: figura (a) - porcentagem de custo para o caso base do estudo; figura (b) - porcentagem de custo.	20
Figura 10: Esquematização simplificada de um refrigerador solar em ciclo de adsorção contínuo.	22
Figura 11: Diagrama de Clapeyron.	25
Figura 12: resultados obtidos no EES.	29
Figura 13: diagrama de Clapeyron do refrigerador plotado pelo EES.	30

LISTA DE SÍMBOLOS

Q = quantidade de calor transferido (kJ);

m = massa (kg);

c_p = calor específico ($\frac{J}{kg}$);

ΔT = variação de temperatura ($^{\circ}C$);

Q_{ag} = calor necessário para gerar carga de resfriamento (kJ);

m_{ag} = massa do fluido a ser resfriado (kg);

cp_{ag} = calor específico do fluido a ser resfriado ($\frac{J}{kg}$);

ΔT_{ag} = variação de temperatura do fluido resfriado ($^{\circ}C$);

Q_{ad} = carga de resfriamento do fluido de trabalho (kJ);

m = massa do fluido de trabalho (kg);

c_p = calor específico do fluido do fluido de trabalho ($\frac{J}{kg}$);

ΔT = variação de temperatura do fluido de trabalho ($^{\circ}C$);

Q_{cond} = carga de resfriamento no condensador (kJ);

m_{cond} = massa de fluido condensada (kg);

cp_{cond} = calor específico do fluido no condensador ($\frac{J}{kg}$);

ΔT_{cond} = variação de temperatura do fluido no condensador ($^{\circ}C$);

Ma = massa de água (kg)

Ms = massa de sílica (kg)

x = relação de massa de água e sílica do sistema (adimensional)

Q_{ads} = energia necessária para carga de resfriamento (kJ)

P_s = massa específica da cama de adsorção (kg/m^3)

V_s = volume da cama de adsorção (m^3)

C_s = calor específico da sílica ($\frac{J}{kg}$)

C_a = calor específico da água ($\frac{J}{kg}$)

ΔT_L = variação de temperatura na cama de adsorção ($^{\circ}C$)

Q_1 = energia de regeneração do resfriamento no adsorvedor 1 (kJ)

$Q_2 =$ energia de regeneração do resfriamento no adsorvedor 2 (kJ)

$Q_3 =$ energia absorvida na placa do adsorvedor (kJ)

$P_{placa} =$ massa específica do adsorvedor (kg/m^3)

$V_{placa} =$ volume da placa do adsorvedor (m^3)

$Cp_{placa} =$ calor específico da placa do adsorvedor ($\frac{\text{J}}{\text{kg}}$)

$\Delta T_{placa} =$ variação de temperatura na cama de adsorção ($^{\circ}\text{C}$)

$Q_4 =$ energia absorvida na placa do adsorvedor 2 (kJ)

$COP =$ coeficiente de performance do refrigerador (adimensional)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 OBJETIVOS	9
3.1 Geral	9
3.2 Específicos	9
3 REVISÃO DE LITERATURA	9
4 METODOLOGIA	18
5 RESULTADOS	25
6 CONCLUSÃO	26
7 ANEXOS	27
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia para processos e tecnologias faz o debate sobre matrizes energéticas sustentáveis essencial. É fundamental buscar alternativas que substituam as fontes esgotáveis. Entre os desafios, está a superação das condições ambientais para viabilizar novas tecnologias, como usar a radiação solar para reduzir a temperatura em sistemas controlados. Uma aplicação viável da energia solar é substituir os sistemas convencionais de refrigeração por compressão, que consomem muita energia elétrica, por alternativas como a refrigeração por adsorção. Usar energia solar para refrigeração, ao invés dos métodos tradicionais, permite explorar o potencial sustentável e eficiente da refrigeração por adsorção, conhecida pela alta eficiência energética.

Mudanças climáticas terão impactos significativos em um futuro próximo, destacando a importância de medidas para reduzir seus efeitos. Atualmente, com um aquecimento atual de 1,1°C, metade da população mundial já enfrenta insegurança com recursos hídricos. Inundações e tempestades afetam mais de 20 milhões de pessoas todos os anos. Temperaturas mais altas contribuem para a propagação de vetores, como a cólera, dengue e malária. O IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) estima que as mudanças climáticas colocarão de 32 milhões a 132 milhões de pessoas na extrema pobreza e insegurança alimentar nos próximos 10 anos, em um cenário em que 3,3 bilhões de pessoas vivem em países vulneráveis aos impactos climáticos. Dentre as três abordagens adaptativas de combate às mudanças climáticas, a refrigeração por adsorção se adequa em novas tecnologias e infraestrutura possuindo baixíssimo potencial de agressão aos recursos naturais (WRI BRASIL, 2022).

O número de aparelhos de ar-condicionado em operação no Brasil cresceu mais de 200 vezes entre 2002 e 2017, e segundo a Empresa de Pesquisa Energética, o número mais que dobrará entre 2017 e 2035 (BEZERRA, 2021). Com a emergente adesão dos aparelhos condicionadores de ar nas residências brasileiras, eleva-se o potencial de degradação pelo consumo excessivo de energia e emissão de componentes tóxicos na atmosfera. A emissão de fluidos refrigerantes fluorados (HFC, CFC's e HCFC's) prejudiciais a camada de ozônio podem aumentar em 88% até o ano de 2050 no Brasil, com a contribuição de aparelhos de condicionamento de ar, tornando a busca por medidas alternativas essencial para o controle do cenário (HEBEDA, 2017).

O aquecimento global, diretamente relacionado às fontes de energia esgotáveis agressivas à camada de ozônio, enfatizou a atenção de diversos pesquisadores na energia solar, atraindo sua aplicação para edificações (ZHAI, 2008). Setores competitivos como indústria e comércio podem ser completamente inviabilizados em situações de má eficiência energética, afetando a produtividade em condições estressantes em períodos de temperatura elevada (BORG, 2021), o que fomenta a busca por recursos renováveis e tecnologias associadas para crescimento sustentável em longo prazo. Entre 2013 e 2020, o Brasil investiu cerca de 2 bilhões em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias envolvendo eficiência energética, conforme a figura 1, demonstrando um cenário favorável de crescimento através do aumento de quase 50% dos recursos investidos no intervalo. (BEN, 2023).



Figura 1: Evolução dos investimentos em eficiência energética

Fonte: BEN (2023).

O uso de sistemas de coletores tubulares e aquecedores alimentados pela radiação solar utilizados para o aquecimento de água utilizada para banho e piscinas em edificações evitou o consumo de $8,67 \cdot 10^9$ MWh em 2021, o equivalente a produção de 3 anos da usina de Itaipu segundo sua geração energética em 2022, demonstrando o potencial da energia solar armazenada em coletores. Mesmo possuindo baixo índice de unidades por residência, equipamentos condicionadores de ar apresentam o maior consumo energético individual entre os aparelhos presentes em residências, conforme a figura 2, reforçando a exploração de uma alternativa sustentável aos equipamentos de refrigeração. (BEN, 2023).

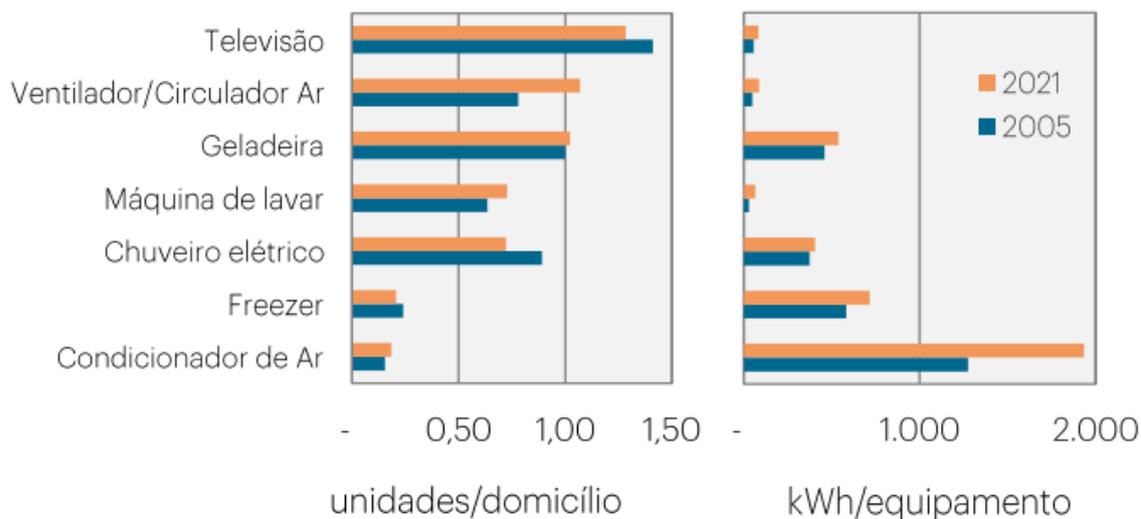


Figura 2: Posse e consumo médio anual por equipamento.

Fonte: BEN (2023).

Por serem mais acessíveis, equipamentos de ar condicionado com menor eficiência energética são os mais utilizados. A tendência é que os números continuem aumentando, pois nas partes mais quentes do mundo apenas 8% da população possui acesso aos aparelhos de ar condicionado (BURROWS, 2022). Segundo o Atlas de Eficiência Energética do ano de 2022 o setor de edificações consumiu 6% da eletricidade do país, possuindo potencial para economia de energia. A climatização tem se consolidado como um fator crítico no consumo energético do Brasil, impulsionada por ondas de calor cada vez mais intensas e pelo aumento da renda da população. Nesse contexto, aprimorar a eficiência energética dos aparelhos não apenas reduz o impacto no consumo, mas também contribui para a sustentabilidade e a estabilidade do sistema elétrico como um todo (BEZERRA, 2021).

O relatório do IPCC destaca o desenvolvimento tecnológico na mitigação dos efeitos climáticos. A seção dedicada às edificações no relatório enfatiza a integração da eficiência energética, energias renováveis e práticas sustentáveis na concepção e operação dos edifícios, com o objetivo de reduzir as emissões de carbono e aumentar a resiliência às mudanças climáticas (IPCC, 2023). Desta forma, tecnologias de refrigeração aliadas à exploração de energia solar podem resultar no desenvolvimento de uma alternativa sustentável que substitua a refrigeração por compressão convencional. Este trabalho visa avaliar por meio de uma simulação computacional um modelo de refrigerador solar utilizando ciclo contínuo de

adsorção através do par adsorvente sílica gel-água para analisar sua aplicabilidade na refrigeração de edificações e avançar em direção a soluções sustentáveis e eficientes.

2 OBJETIVOS

3.1 Geral

Dimensionar o refrigerador solar por adsorção em ciclo contínuo e avaliar seu desempenho e viabilidade em relação a outros refrigeradores por adsorção sólida e a compressão.

3.2 Específicos

Elaborar a revisão de literatura reunindo estudos acerca da aplicação do refrigerador por adsorção para a refrigeração de edificações, realizar a modelagem térmica do ciclo utilizando o software Engineering Equation Solver (EES – ENGINEERING EQUATION SOLVER, 2018), definir os componentes do refrigerador solar por adsorção, verificando estados em cada etapa do ciclo e a troca de calor realizada para validar a eficiência, analisar os resultados obtidos em comparação aos refrigeradores por compressão.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A adsorção sólida é o processo no qual uma substância se concentra na superfície de um material. Adotando como par adsorvente sílica gel-água, um ciclo intermitente básico de refrigeração por adsorção pode ser descrito utilizando o adsorvente (sílica gel), um fluido refrigerante (água) e dois recipientes ligados por um canal. O fluido refrigerante inicialmente adsorvido em sílica gel no primeiro recipiente a uma baixa pressão e temperatura, recebe um aumento de calor elevando sua pressão, levando-o a dessorção e condensação no segundo recipiente. Posteriormente, a redução da pressão faz com que o refrigerante evapore no segundo recipiente, absorvendo calor do meio e produzindo o efeito esperado de refrigeração, retomando o estado inicial do ciclo (ALBUQUERQUE, 2005).

A refrigeração solar pode ser classificada em dois tipos: refrigeração solar por sorção, divididos entre refrigeradores por adsorção e absorção, e refrigeração solar mecânica. O primeiro utiliza a energia térmica solar para realizar a redução de temperatura, enquanto o segundo utiliza a conversão da radiação solar em energia elétrica. A refrigeração solar mecânica

pode custar até quatro vezes mais que os sistemas que utilizam adsorção, além de ser menos eficiente, justificando a maior adesão dos sistemas de sorção em se tratando de refrigeradores solares (ZHAI, 2008). O estudo de Motamedi (2022) descreve a operação do refrigerador por adsorção em ciclo contínuo representado na figura 3 em três etapas: (1) o ciclo de aquecimento, em que o coletor recebe energia solar e eleva a temperatura da água que será armazenada a alta pressão em um tanque, (2) o ciclo de aquecimento auxiliar, que opera quando a temperatura da água não atinge o limite mínimo estabelecido para refrigerar, (3) e o ciclo de troca de calor, em que a água atua como fluido refrigerante.

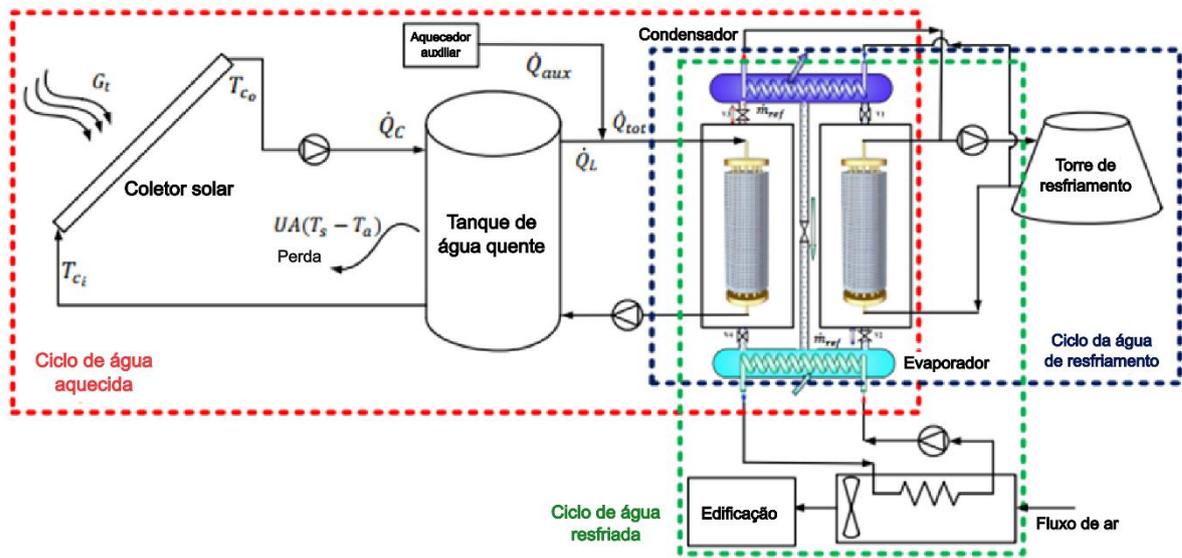


Figura 3: Diagrama de refrigerador por adsorção em ciclo contínuo.

Fonte: Adaptado (Motamedi 2022).

Zhai (2008) apresenta um refrigerador por adsorção contínuo que integra duas unidades de leito em um sistema com três cavidades a vácuo, composto por camadas de adsorção/dessorção, uma válvula de vácuo para recuperação de massa e uma câmara que funciona como tubo para transferência de calor entre os componentes. O adsorvedor utiliza tubos finos que ampliam a superfície de contato, maximizando a transferência de calor, enquanto o condensador é um trocador de calor do tipo STHE, que recebe o vapor do adsorvedor para realizar a condensação. O resfriamento do evaporador é efetuado por uma câmara de metanol que atua como tubo de calor por gravidade. Operando com o par adsorptivo sílica gel-água entre 60 °C e 95 °C, o sistema de dois refrigeradores pode ser combinado em um único dispositivo alternando o ciclo

das camas de adsorção. Na análise matemática do ciclo, o autor destaca três etapas principais: o aumento da energia interna do tanque de armazenamento de água quente, a perda de calor pelo tanque e o calor consumido pelo refrigerador, utilizando valores experimentais para determinar a energia útil recebida pelos coletores solares. (ZHAI, 2008).

O refrigerador por adsorção adotado por Gediz (2021) possui dois componentes principais: um evaporador e um segundo elemento que combina a cama de adsorção com o condensador. Essa escolha visa otimizar o aproveitamento da água condensada em alta temperatura, evitando que parte dela condense na própria cama de adsorção. Essa configuração também reduz o peso do refrigerador e melhora a transferência de calor. A troca de calor ocorre por meio de um dispositivo dentro do evaporador para transferir calor à água, sendo que o evaporador recebe a água condensada mantendo sua pressão por um tubo capilar tipo S. Ele é abastecido com água deionizada e o ar é removido por uma bomba de vácuo. Na etapa seguinte, inicia-se o processo de adsorção na cama, que recebe a água deionizada, dando início ao ciclo. A água evaporada escoava pelo conjunto condensador-cama de adsorção e é adsorvida pela sílica gel, enquanto a água refrigerada começa a circular na cama para resfriamento. Em seguida, a água aquecida passa a circular para elevar a pressão interna da cama de adsorção. Ao atingir a pressão desejada, um cooler é acionado para reduzir a temperatura, e então ocorre a dessorção, quando a água da cama de adsorção escoava para o reservatório de água no evaporador, que no design adotado está combinado à cama de adsorção. Os resultados obtidos por simulação do ciclo, quando comparados ao experimento realizado no protótipo de refrigerador por adsorção, mostraram concordância, conforme indicado nas figuras 4 e 5.

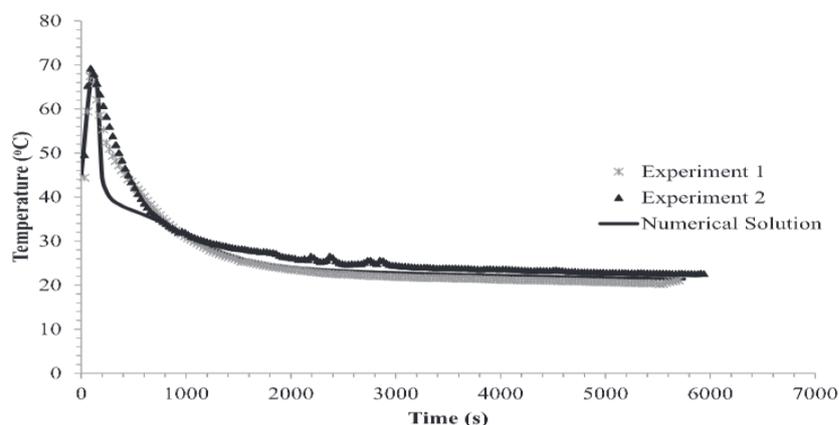


Figura 4: comparação da temperatura média da cama de adsorção entre experimental e modelagem na fase de adsorção.

Fonte: Gediz (2021).

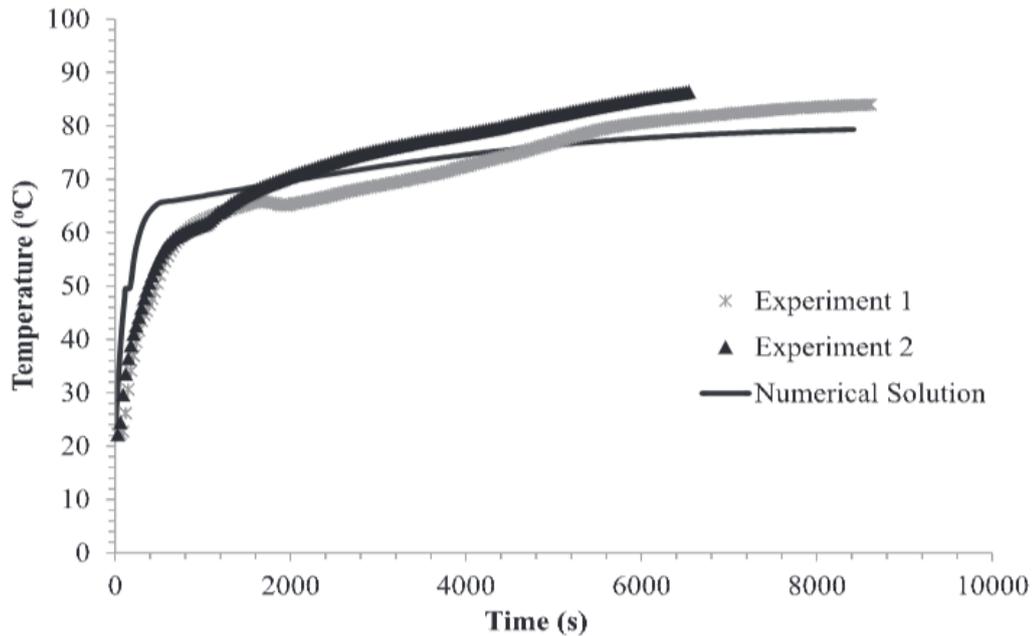


Figura 5: Comparação da temperatura média da cama de adsorção entre experimental e modelagem na fase de adsorção.

Fonte: Gediz (2021).

Palomba (2019) conduziu estudos avaliando um sistema composto pela integração de um refrigerador por adsorção com um refrigerador por compressão. Quando a energia solar está disponível, é usada para operar o refrigerador aquecendo as camas de adsorção. A refrigeração ao usuário final é fornecida pela evaporadora. O calor gerado pelo compressor é também aproveitado pelas camas de adsorção como fonte de energia. Para avaliar o refrigerador por adsorção combinado ao modelo de compressão convencional, uma abordagem física/dinâmica foi adotada, permitindo descrever o comportamento complexo das fases de operação do refrigerador. O modelo de adsorção utiliza duas camas para operar de maneira intermitente, utilizando como adsorvente o SAPO 34 (zeólito da família dos alumino fosfatos) e água como adsorbato. O escoamento do fluido refrigerante é realizado por uma válvula de expansão. Dois modelos são utilizados para descrever o comportamento do refrigerador híbrido: o modelo VLE (equilíbrio vapor-líquido) para o condensador e para a evaporadora e para as camas de adsorção o modelo adotado de equilíbrio de adsorção.

Yaici (2019) descreve a operação do refrigerador por adsorção em duas etapas principais: a fase de dessorção-condensação e a fase de adsorção-evaporação. Durante a primeira fase, o adsorvedor absorve energia solar concentrando-a no adsorvente. A concentração de calor faz com que o adsorvente libere o fluido refrigerante para a condensadora. A primeira etapa tem seu término concluído quando o refrigerador se aproxima do equilíbrio entre a quantidade de refrigerante liberada pelo adsorvedor e a quantidade condensada. A segunda fase se inicia após a dessorção, em que as camas de adsorção recebem o refrigerante em forma de vapor para reiniciar o ciclo (YAIKI, 2019).

Sabe-se que à medida que a temperatura se eleva durante os períodos quentes ao longo do ano, a demanda de energia utilizada para refrigeração de ambientes aumenta. Em períodos de seca a produção de energia é afetada pelo baixo nível dos reservatórios de hidrelétricas, causando quedas constantes em grandes centros nos períodos de maior utilização dos aparelhos de ar. (PALOMBA, 2019). Sistemas de refrigeração solar podem beneficiar significativamente a redução de utilização de energia em períodos de pico e na emissão de CO₂, contribuindo com políticas sustentáveis de desenvolvimento (YAIKI, 2019).

Segundo a IEA, 2/3 das edificações no mundo terão aparelhos condicionadores de ar até 2050. (IEA, 2018). Estudos conduzidos com o intuito de avaliar o desempenho de refrigeradores por adsorção para edificações com elevada demanda de climatização e em regiões quentes demonstraram que seu atendimento é satisfatório assim como a refrigeração convencional. Ademais, um dos pontos favoráveis da refrigeração por adsorção é seu potencial de contribuição para a redução da emissão de CO₂ na atmosfera e seu potencial de substituição na parcela aplicada em energia elétrica para refrigeração (AL-YASIRI, 2022).

Apesar das vantagens acerca da refrigeração convencional a refrigeração por adsorção para edificações possui elevado custo inicial, inviabilizando-a economicamente em certos casos. O custo da eletricidade em relação à renda mensal total pode influenciar diretamente na aplicabilidade do sistema de refrigeração por adsorção. Investir na criação de um refrigerador com baixo custo inicial proveniente de materiais reaproveitados pode combater essa desvantagem (PALOMBA, 2019). O elevado custo de implantação e a baixa eficiência em relação ao sistema convencional em se tratando do investimento são dificuldades enfrentadas pela refrigeração por adsorção em penetrar o mercado. Sua complexidade operacional e necessidade de mão de obra especializada também dificultam a disseminação do sistema (AL-

YASIRI, 2022). O coeficiente de performance (COP) médio de refrigeradores por adsorção varia entre 0,3 e 0,65, enquanto o COP de refrigeradores por compressão situa-se entre 2,5 e 5. Para que os refrigeradores por adsorção se tornem mais competitivos em relação ao sistema convencional, é fundamental aumentar seu COP e otimizar a configuração operacional. Isso se deve ao fato de que, nas pesquisas sobre refrigeradores solares, o número de simulações realizadas é significativamente superior ao de experimentos práticos (AL-YASIRI, 2022).

Ao avaliar as etapas do refrigerador em simulação e experimento, Gediz (2021) demonstrou os valores obtidos em cada etapa do ciclo. A vazão mássica tem elevado impacto no COP do refrigerador por adsorção, em contrapartida, a área do condensador não causa impacto significativo. Ao comparar os resultados obtidos para cada etapa do ciclo do refrigerador entre experimento e simulação obtida pelo software MATLAB, Gediz (2021) mostrou consistência entre as análises experimentais e estimativas (figura 6).

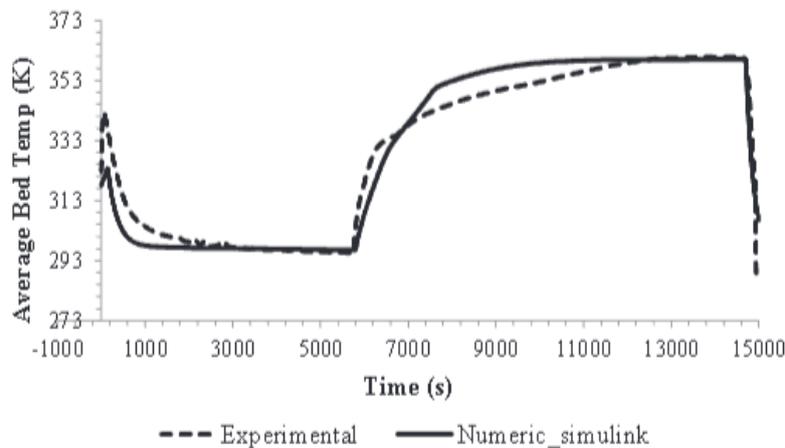


Figura 6: Variação de temperatura de um ciclo do refrigerador - comparação entre experimento e simulação MATLAB.

Fonte: Gediz, 2021

Zhai (2008) avaliou a capacidade de redução de temperatura utilizando refrigeração por adsorção em uma edificação do Instituto de Pesquisa de Shanghai de Ciência de Edificações. Para refrigerar a edificação de 460m² foi necessário a utilização de um tanque de 2,5m³ para armazenar o calor solar do sistema, dimensionado para atender 15kW dos 60kW demandados. Buscando uma transição ótima entre a utilização das duas camas de adsorção do refrigerador,

em que não há perda significativa de refrigeração e eficiência, o autor encontrou uma alternância de 540 segundos entre a utilização de cada cama de adsorção utilizando uma análise de variância. Por sua característica operacional intermitente, é extremamente importante adotar um intervalo ótimo para operar o refrigerador sem gerar consequências bruscas no efeito frigorífico. (ZHAI, 2008)

Para o estudo, o COP médio do refrigerador foi de 0,35 e o COP médio do coletor solar foi de 0,15. A capacidade máxima de utilização de energia para refrigeração foi de 20kW com uma área de 150m² de coletores solares. O autor demonstra que a medida em que a temperatura aumenta, a capacidade do refrigerador em elevar seu COP também aumenta (figura 4). Apesar de correlacionados, o aumento da temperatura tem maior impacto sobre o efeito frigorífico que na temperatura interna do ambiente refrigerado. (ZHAI, 2008)

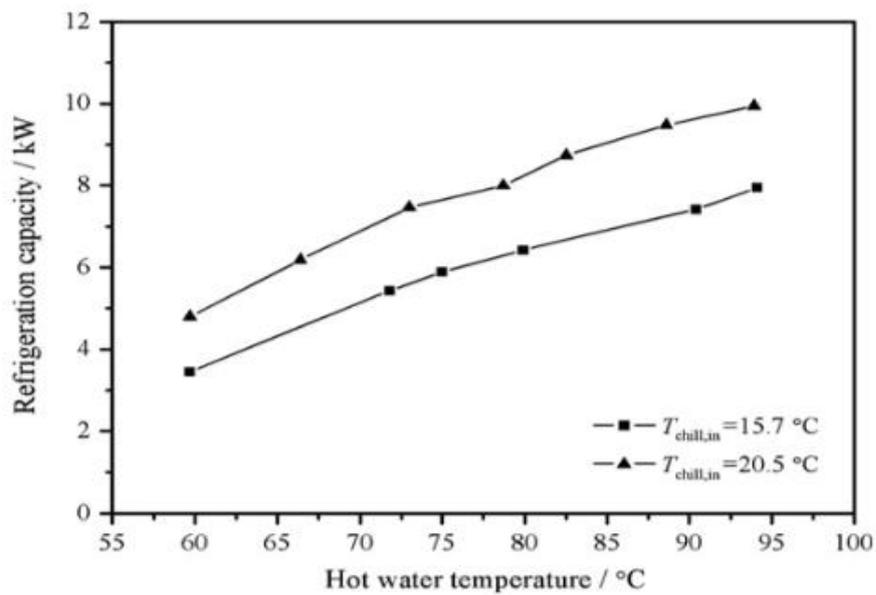


Figura 7: Variação de temperatura de um ciclo do refrigerador - comparação entre experimento e simulação MATLAB.

Fonte: Zhai, 2008.

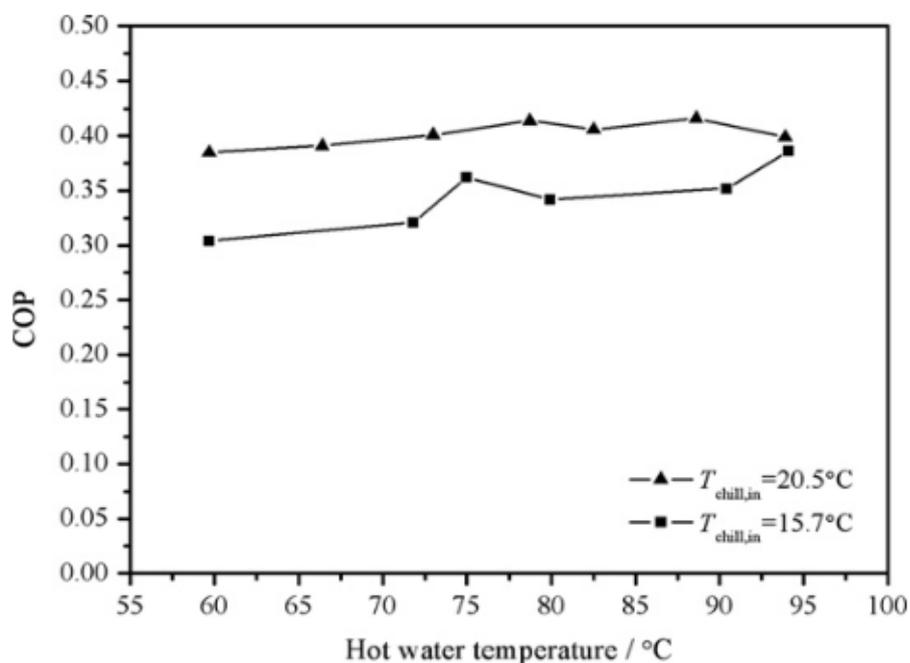


Figura 8: Variação do COP de um ciclo do refrigerador - comparação entre experimento e simulação MATLAB.

Fonte: Zhai, 2008.

Devido ao elevado custo inicial refrigeradores solares se tornam mais atrativos quando aplicados para suprir uma demanda de 50kW, o equivalente a um ar-condicionado de 12 mil BTUs. Para viabilizar a aplicação dos refrigeradores solares, pesquisas de inovação devem focar não apenas no refrigerador, mas em seus componentes e otimização de operação para validar uma aplicação comercial, o que permite atrair mais investidores e fomentar seu desenvolvimento. O incentivo governamental deve atuar de forma incisiva para superar as barreiras econômicas envolvendo pesquisas e utilização do refrigerador. (SHIRAZI, 2018). Bouhal et al. (2016, apud Motamedi, 2022) reforçam a necessidade de subsídios governamentais para avançar em estudos que condicionem o refrigerador a concorrer com sistemas de compressão, embasando-se no potencial sustentável do projeto e em seu retorno a longo prazo (Motamedi, 2022).

Yaici (2019) reitera a relevância do design do refrigerador ao demonstrar que o diâmetro do adsorvente e a espessura dos tubos do coletor (ou da placa utilizada para regenerar o ciclo) impactam significativamente na eficiência. Refrigeradores por adsorção podem ser operados com baixa complexidade mecânica, evitando o uso de válvulas, bombas ou equipamentos

sofisticados, reduzindo a necessidade de revisões e falhas nos componentes (YAICI, 2019). Wajid, utilizando o TRNSYS (Transient System Simulation Tool), validou a eficácia do refrigerador por adsorção em obter conforto térmico satisfatório para edificações em regiões com picos de temperatura e umidade. (WAJID, 2021)

Reda et al. (2016, Apud MOTAMEDI, 2022) investigou melhorias de um sistema solar de pequena escala sistema de resfriamento por adsorção motorizado no Egito. Uma abordagem baseada em otimização determinou a escolha do melhor tamanho dos principais componentes do refrigerador movido a energia solar, sistema de resfriamento com par de sílica gel e água. Os resultados demonstram que o custo de implantação do sistema de refrigeração é de 39 vezes o custo de operação anual do refrigerador.

Ao avaliar uma configuração otimizada do refrigerador por adsorção, Motamedi destaca a redução da área do coletor solar e a redução do volume do tanque de armazenamento de água em elevada temperatura. Em contrapartida a otimização aumenta significativamente a vazão mássica do sistema (figura 5). (MOTAMEDI, 2022)

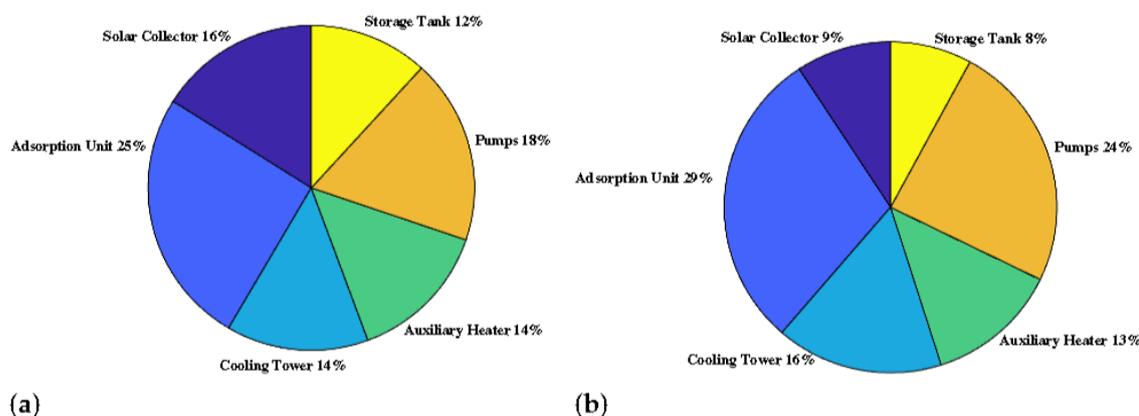


Figura 9: figura (a) - porcentagem de custo para o caso base do estudo e porcentagem de custo da otimização (b).

Fonte: Motamedi, 2008.

A comercialização dos refrigeradores por adsorção enfrenta dificuldades em relação ao sistema convencional por compressão. O custo-benefício do refrigerador pode variar em relação ao custo da eletricidade no país em que é aplicado (MOTAMEDI, 2022). Entre as principais dificuldades estão o alto custo inicial, a menor eficiência em comparação com os sistemas tradicionais e o curto período de disponibilidade de energia térmica durante o dia, tornando

necessário o uso de componentes como boilers para armazenar energia térmica, o que eleva ainda mais o custo inicial. (ZHAI, 2008)

Sistemas de refrigeração por adsorção possuem zero potencial de degradação da camada de ozônio. (SHABIR et al., 2018). Estudos de implementação utilizando um refrigerador por adsorção intermitente obtiveram temperaturas na parede externa do evaporador de 4,4°C, e nos dias com baixo índice de radiação solar foram obtidas temperaturas de 9,4°C (ARAÚJO, 2009). O Grupo de Engenharia Térmica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE confeccionou um refrigerador por adsorção em ciclo intermitente, constatando temperaturas da ordem de 5 °C (ALBUQUERQUE, 2005). O refrigerador por adsorção em ciclo contínuo consiste em adicionar uma outra cama de adsorção/dessorção ao sistema de refrigeração intermitente, tornando o processo contínuo e elevando significativamente a eficiência na obtenção do efeito frigorífico esperado em relação a modelos intermitentes (CHUA et al., 1999).

As pesquisas engajadas na produção de alternativas energéticas não degradantes ao meio ambiente e a camada de ozônio contribuem para a descentralização das fontes esgotáveis. Tecnologias como a refrigeração por adsorção que possuem um design simplificado, sem necessidade direta de alimentação elétrica, avançam significativamente na redução dos impactos ambientais e aproveitamento dos recursos naturais. Refrigeradores por adsorção alimentados pelo calor solar operando com baixas temperaturas e pressão estão se tornando emergentes por conciliar os picos de temperatura e utilização da refrigeração em edificações (YAICI, 2019).

4 METODOLOGIA

A seguinte pesquisa pretende analisar os resultados obtidos através da simulação de um refrigerador solar por adsorção em ciclo contínuo, comparando-o ao modelo por compressão, através da refrigeração de um recipiente experimental. A busca por trabalhos que utilizam a refrigeração por adsorção para gerar efeito frigorífico contínuo permitiu a elaboração e o dimensionamento de um modelo, visando um protótipo simplificado. O modelo analisado possui os seguintes componentes principais: duas camas de adsorção, um condensador e uma

evaporadora. Os componentes foram dimensionados para atender a capacidade de refrigeração de um ar condicionado por compressão.

O par adsorvente adotado é a sílica gel-água, respectivamente adsorvente e fluido de trabalho, sendo a fonte de calor obtida de coletores solares. O refrigerador em ciclo contínuo (Figura 10) opera com duas camas de adsorção, em que quando o adsorvedor 1 estiver em fase de adsorção, o adsorvedor 2 estará em fase de dessorção, possibilitando a manutenção de refrigeração do sistema sem interrupções. Quando a cama de adsorção 1 (Adsorvedor 1) estiver no modo de adsorção, a válvula V3 entre o adsorvedor 1 e o evaporador é aberta, enquanto a válvula V2 está fechada. O fluido refrigerante (água) evapora no evaporador, gerando o efeito frigorífico. Ao mesmo tempo, o adsorvedor 2 estará em modo de dessorção com a válvula V4 aberta, entre a cama de adsorção 2 (Adsorvedor 2) e o condensador, enquanto a válvula V5 está fechada. O fluido é então dessorvido e escoar para o condensador. Após condensar, o fluido escoar para o evaporador. Por fim, o adsorvedor 1 entra no modo de dessorção e o adsorvedor 2 entra em modo de adsorção, reiniciando o ciclo e tornando o efeito frigorífico contínuo.

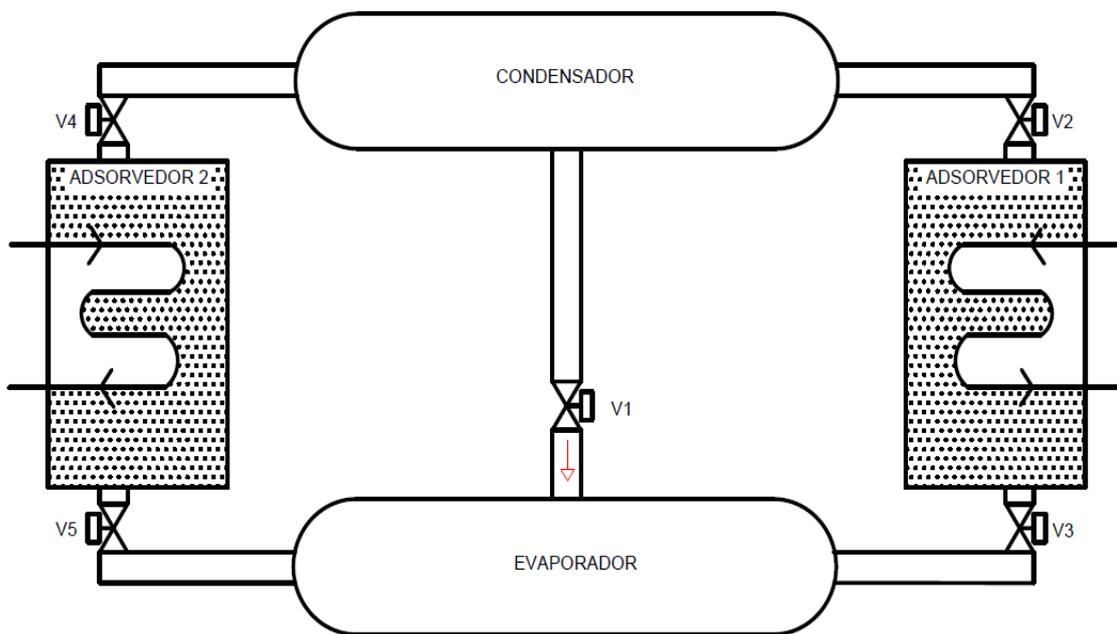


Figura 10: Esquematização simplificada de um refrigerador solar em ciclo de adsorção contínuo.

Fonte: elaboração própria.

Os componentes do refrigerador são divididos em volume de controle para realização da modelagem térmica, ou seja: cada componente é analisado individualmente por meio de seu balanço de energia. O balanço de energia determinará as trocas de calor entre os componentes. Segundo Çengel (2012), trocadores de calor como um condensador e evaporador podem ser considerados dispositivos de escoamento permanente, simplificando sua modelagem sem retirar a precisão significativa do cálculo realizado. Baseando-se no modelo proposto por Albuquerque (2005) os volumes de controle avaliados são: Evaporador, Condensador e Absorvedores. Através da aplicação da primeira lei da termodinâmica nos volumes de controle obtém-se a quantidade de energia necessária para que o refrigerador por adsorção atenda a demanda de um ar condicionado de 12mil BTUs, servindo como fonte a energia térmica solar captada pelo adsorvedor, estimada pelo LABREN – Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira, 2017) para a microrregião de Rio Verde – GO.

Primeira Lei da Termodinâmica:

$$Q = m c_p \Delta_T \tag{Eq. 1.1}$$

Em que:

$Q =$ quantidade de calor transferido (kJ);

$m =$ massa (kg);

$c_p =$ calor específico ($\frac{J}{kg}$);

$\Delta_T =$ variação de temperatura ($^{\circ}C$);

Aplicação da Eq. 1 nos componentes do refrigerador para estimar a troca de calor e variação de temperatura:

Evaporador:

Fluido resfriado pelo refrigerador:

$$Q_{ag} = m_{ag} c_{p_{ag}} \Delta T_{ag} \tag{Eq. 1.1}$$

1.1)

Em que:

$Q_{ag} =$ calor necessário para gerar carga de resfriamento (kJ);

$m_{ag} =$ massa do fluido a ser resfriado (kg);

cp_{ag} = calor específico do fluido a ser resfriado ($\frac{J}{kg}$);

ΔT_{ag} = variação de temperatura do fluido resfriado ($^{\circ}C$);

Adsorbato (Fluido de Trabalho):

$$Q_{ad} = m_{ad}cp_{ad}\Delta T_{ad} \quad (\text{Eq. 1.2})$$

Em que:

Q_{ad} = carga de resfriamento do fluido de trabalho (kJ);

m = massa do fluido de trabalho (kg);

c_p = calor específico do fluido do fluido de trabalho ($\frac{J}{kg}$);

ΔT = variação de temperatura do fluido de trabalho ($^{\circ}C$);

Condensador:

$$Q_{cond} = m_{cond}cp_{cond}\Delta T_{cond} \quad (\text{Eq. 1.3})$$

Em que:

Q_{cond} = carga de resfriamento no condensador (kJ);

m_{cond} = massa de fluido condensada (kg);

cp_{cond} = calor específico do fluido no condensador ($\frac{J}{kg}$);

ΔT_{cond} = variação de temperatura do fluido no condensador ($^{\circ}C$);

Adsorvedores:

Albuquerque (2005) propôs uma solução para a análise termodinâmica do leito adsorativo, composto de sílica gel e água, ao combinar seu calor específico na relação de concentração de ambos:

$$Ma = x Ms \quad (\text{Eq. 1.4})$$

Em que:

Ma = massa de água (kg)

Ms = massa de sílica (kg)

x = relação de massa de água e sílica do sistema (adimensional)

Em que Ma é a massa de água e Ms a massa de sílica gel, permitindo realizar o balanço de energia no leito e na placa dos adsorvedores através da primeira lei da termodinâmica:

$$Q_{ads} = P_s V_s (C_s + x C_a) \Delta T_L \quad (\text{Eq. 1.5})$$

Em que:

Q_{ads} = energia necessária para carga de resfriamento (kJ)

P_s = massa específica da cama de adsorção (kg/m^3)

V_s = volume da cama de adsorção (m^3)

C_s = calor específico da sílica ($\frac{\text{J}}{\text{kg}}$)

C_a = calor específico da água ($\frac{\text{J}}{\text{kg}}$)

ΔT_L = variação de temperatura na cama de adsorção ($^{\circ}\text{C}$)

Leito do Adsorvedor 1:

$$Q_1 = P_s V_s (C_s + x C_a) \Delta T_L \quad (\text{Eq. 1.6})$$

Em que:

Q_1 = energia de regeneração do resfriamento no adsorvedor 1 (kJ)

Leito do Adsorvedor 2:

$$Q_2 = P_s V_s (C_s + x C_a) \Delta T_L \quad (\text{Eq. 1.7})$$

Em que:

Q_2 = energia de regeneração do resfriamento no adsorvedor 2 (kJ)

Placa do Adsorvedor 1:

$$Q_3 = P_{placa} V_{placa} c_{p_{placa}} \Delta T_{placa} \quad (\text{Eq. 1.8})$$

Em que:

Q_3 = energia absorvida na placa do adsorvedor (kJ)

P_{placa} = massa específica do adsorvedor (kg/m^3)

V_{placa} = volume da placa do adsorvedor (m^3)

$c_{p_{placa}}$ = calor específico da placa do adsorvedor ($\frac{\text{J}}{\text{kg}}$)

ΔT_{placa} = variação de temperatura na cama de adsorção ($^{\circ}\text{C}$)

Placa do Adsorvedor 2

$$Q_4 = P_{placa} V_{placa} c_{pplaca} \Delta T_{placa} \text{ (Eq. 1.9)}$$

Em que:

$$Q_4 = \text{energia absorvida na placa do adsorvedor 2 (kJ)}$$

COP do refrigerador

$$COP = Q_{ag}/Q_{ads}$$

O ciclo de refrigeração por adsorção pode ser explícito através das etapas do diagrama de Clapeyron, composto por duas isotermas e duas isóbaras, demonstrando a pressão e a temperatura do refrigerador em cada etapa. A reta A-B corresponde a etapa de aquecimento e aumento de pressão no leito adsorativo do coletor solar. Ao atingir o ponto B, dá-se início a condensação do fluido refrigerante a alta pressão, correspondente a etapa B-C. Durante esta etapa o fluido está a alta temperatura no condensador, que dissipará parte do calor do fluido mantendo sua elevada pressão. Na etapa C-D o fluido passa pelo processo de expansão por meio de um tubo capilar que levará a serpentina do evaporador, gerando o efeito frigorífico através da pressão anteriormente coletada pelo calor solar. Por fim, a etapa D-A demonstra a redução de temperatura e regeneração do estado inicial em que o fluido refrigerante está adsorvido na sílica gel. Para manter o efeito de refrigeração continuamente, os adsorvedores operarão em fase inversa. Enquanto o Adsorvedor 1 estiver nas etapas A-B-C (Aquecimento, Pressurização, Dessorção, Condensação) o Adsorvedor 2 estará nas etapas C-D-A (Expansão, Despressurização, Efeito frigorífico e Adsorção).

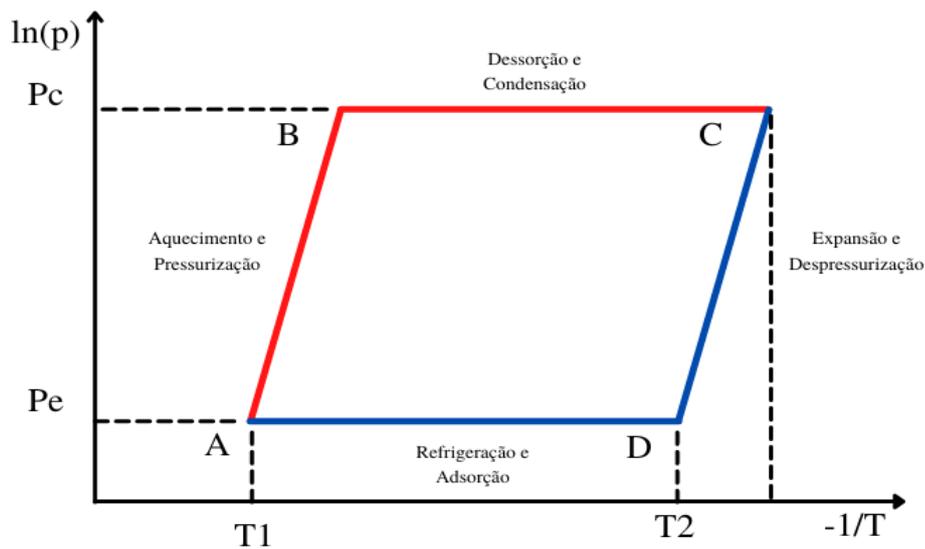


Figura 11: Diagrama de Clapeyron.

Fonte: elaboração própria.

Utilizando o Engineering Equation Solver (EES – ENGINEERING EQUATION SOLVER, 2018), foi conduzida uma simulação da operação do refrigerador considerando as quatro transformações fundamentais do ciclo (dessorção, condensação, evaporação e adsorção). Foram considerados dados referentes à temperatura, pressão e vazão mássica durante um ciclo do refrigerador, possibilitando a obtenção do coeficiente de performance por meio do código desenvolvido no anexo I.

5 RESULTADOS

Ao executar o código elaborado no Engineering Equation Solver (EES – ENGINEERING EQUATION SOLVER, 2018), foi possível obter uma estimativa da troca de calor necessária para refrigerar um ambiente com 12 m² considerando um ciclo único de um refrigerador com duas camas de adsorção, conforme a figura 13:

SOLUTION	
Unit Settings: SI C Pa J mass deg	
A _{coletor} = 24,61 [m ²]	COP = 1,001
densidade _{silica} = 700 [kg/m ³]	DT _{condensador} = 5 [C]
DT _{evaporador} = 4 [C]	eficiencia _{coletor} = 0,6
I _{solar} = 238 [W/m ²]	m _{leitoadsortivo} = 0,02773 [kg/s]
m _r = 0,02773 [kg/s]	m _r = 199,7 [kg]
m _s = 798,7 [kg]	P _{adsorvedor} = 1,600E+06 [Pa]
P _{leitoadsortivo} = 400000 [Pa]	Q _{adsorvedor} = 3514 [W]
Q _{cond} = 6962 [W]	Q _{evap} = 3517 [W]
tempo _{ciclo} = 7200 [s]	T _{adsorvedor} = 90 [C]
T _{ambiente} = 25 [C]	T _{evaporador} = 4 [C]
T _{leitoadsortivo} = 60 [C]	V _s = 1,141 [m ³]
X _{max} = 0,3	X _{min} = 0,05

Figura 12: resultados obtidos no EES.

Fonte: elaboração própria.

Após calcular o ciclo completo do refrigerador é possível obter o diagrama de Clapeyron representado na figura 13, demonstrando as quatro transformações ciclo, em que: A-B representa a fase de aquecimento e pressurização, B-C representa a dessorção e condensação, C-D expansão despressurização, D-A resfriamento e recomeço do ciclo com adsorção.

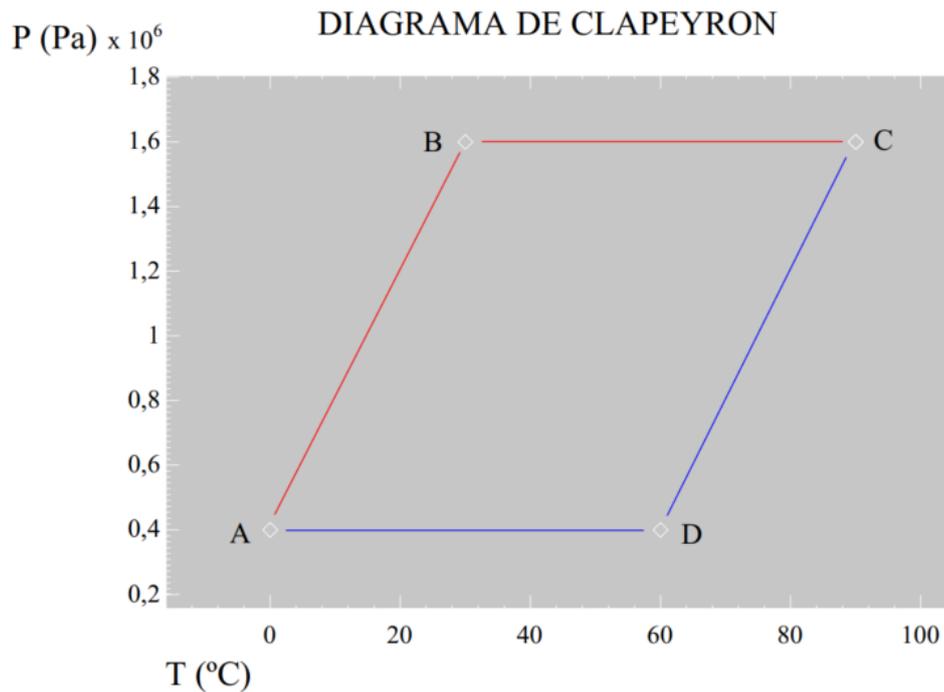


Figura 13: diagrama de Clapeyron do refrigerador plotado pelo EES.

Fonte: elaboração própria.

O COP de 0,5 para cada cama de adsorção (razão entre a carga de resfriamento e trabalho fornecido ao compressor) apresentado pelo refrigerador por adsorção na figura 12 é considerando coerente para o modelo, consoante resultados obtidos por Yasiri (2022). Entretanto, considerando uma aplicação em refrigeração de edificações a eficiência deve aumentar em no mínimo 3 a 5 vezes para atender a mesma eficiência de refrigeradores por compressão. Essa exigência implica em um elevado investimento instrumental e área ocupada pelo refrigerador, conforme resultado da figura 13 em que são necessários 24m² de área para o coletor solar atender a demanda. O código em estudo não considera as perdas térmicas entre os componentes do refrigerador e a eficiência dos materiais envolvidos, o que pode reduzir ainda mais o COP em experimentos com o refrigerador por adsorção.

6 CONCLUSÃO

Embora os refrigeradores por adsorção apresentem um COP baixo, a eficácia do resfriamento que oferecem não pode ser mensurada unicamente por meio de comparações numéricas. Isso se deve ao fato de que por utilizarem energia térmica de baixo custo estes sistemas ganham destaque, oferecendo uma alternativa energeticamente vantajosa. Para elevar o COP do refrigerador por adsorção e torna-lo mais atrativo é necessário implementar melhorias como um par adsorativo mais eficiente, componentes otimizados para melhorar a troca de calor, utilização de aquecedores auxiliares e mais camas de adsorção. Aumentar o número de amostragens experimentais é indispensável para desenvolvimento dos refrigeradores por adsorção, visto que a maioria das pesquisas é realizada por simulações.

É importante destacar que o desenvolvimento e a implementação do refrigerador por adsorção em ciclo contínuo ainda enfrentam desafios tecnológicos e econômicos. A pesquisa e o desenvolvimento de materiais adsorventes eficientes e economicamente viáveis, além da otimização dos processos de adsorção e regeneração são aspectos fundamentais a serem explorados. Além disso, é necessário investimento em infraestrutura e capacitação técnica para a fabricação e manutenção desses sistemas. Somente com a superação desses desafios será possível ampliar a adoção do refrigerador por adsorção em ciclo contínuo como uma solução viável e sustentável para a refrigeração de edificações.

7 ANEXOS

ANEXO I

1: \$UnitSystem SI Mass J K Pa C 2:

3: *"Refrigerador em ciclo de adsorção com par adsorativo sílica gel-água para 12.000 BTU/h"*

4:

5: *"DADOS CONHECIDOS"*

6:

7: T_ambiente=25[C]

8: T_evaporador=4[C]

9: T_adsorvedor=90[C]

10: T_leitoadsorativo=60[C]

11: $P_{\text{adsorvedor}}=1,6e6[\text{Pa}]$
12: $P_{\text{leitoadsortivo}}=0,4e6[\text{Pa}]$
13: $DT_{\text{condensador}}=5[\text{C}]$
14: $DT_{\text{evaporador}}=4[\text{C}]$
15:
16: "*CAPACIDADE DO EVAPORADOR PARA 12.000 BTU/h (3517 W)*"
17: $Q_{\text{dot_evap}}=3517[\text{W}]$
18:
19: "*DEFINIÇÃO DOS ESTADOS TERMODINÂMICOS*"
20:
21: "*VAPOR SAINDO DO ADSORVEDOR PARA O CONDENSADOR*"
22: $T[3]=T_{\text{adsorvedor}}$
23: $P[3]=P_{\text{adsorvedor}}$
24: $h[3]=\text{enthalpy}(\text{Water}; T=T[3]; P=P[3])$
25:
26: "*FLUIDO SAINDO DO CONDENSADOR E ENTRANDO NO PROCESSO DE EXPANSÃO*"
27: $P[4]=P[3]$
28: $T[4]=T_{\text{ambiente}}+DT_{\text{condensador}}$
29: $h[4]=\text{enthalpy}(\text{Water}; T=T[4]; P=P[4])$
30:
31: "*FLUIDO SAINDO DO PROCESSO DE EXPANSÃO E ENTRANDO NO EVAPORADOR*"
32: $P[1]=P_{\text{leitoadsortivo}}$
33: $h[1]=h[4]$
34: $T[1]=T_{\text{leitoadsortivo}}$
35:
36: "*FLUIDO SAINDO DO EVAPORADOR E ENTRANDO NO LEITO ADSORTIVO*"
37: $P[2]=P[1]$
38: $T[2]=T_{\text{evaporador}}-DT_{\text{evaporador}}$
39: $h[2]=\text{enthalpy}(\text{Water}; T=T[2]; P=P[2])$
40:
41: "*REQUECIMENTO DO COLETOR SOLAR*"
42: $P[5]=P_{\text{leitoadsortivo}}$
43: $T[5]=T_{\text{leitoadsortivo}}$
44: $h[5]=\text{enthalpy}(\text{Water}; T=T[5]; P=P[5])$
45:
46: "*CALCULO DA VAZÃO MÁSSICA DO REFRIGERANTE*"
47: $m_{\text{dot_r}}=Q_{\text{dot_evap}}/(h[1]-h[2])$

48:

49: *"BALANÇO DE ENERGIA NO CONDENSADOR"*

50: $Q_{\text{dot_cond}}=m_{\text{dot_r}}(h[3]-h[4])$

51:

52: *"BALANÇO DE MASSA NO LEITO ADSORTIVO/ADSORVEDOR"*

53: $m_{\text{dot_r}}h[2]=m_{\text{dot_r}}h[6]$

54: $m_{\text{dot_leitoadsortivo}}=m_{\text{dot_r}}$

55:

56: *"BALANÇO DE ENERGIA NO ADSORVEDOR"*

57: $Q_{\text{dot_adsorvedor}}=m_{\text{dot_r}}(h[3]-h[5])$

58:

59: *"COEFICIENTE DE PERFORMANCE"*

60: $COP=Q_{\text{dot_evap}}/Q_{\text{dot_adsorvedor}}$

61:

62: *"PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO VOLUME DE SÍLICA E ÁREA DO COLETOR"*

63: $x_{\text{max}}=0,3$

64: $x_{\text{min}}=0,05$

65: $\text{densidade_silica}=700[\text{kg}/\text{m}^3]$

66: $\text{tempo_ciclo}=7200[\text{s}]$

67:

68: *"PARÂMETROS DO COLETOR SOLAR"*

69: $I_{\text{solar}}=238[\text{W}/\text{m}^2]$

70: $\text{eficiencia_coletor}=0,6$

71:

72: *"CÁLCULO DA MASSA TOTAL DE REFRIGERANTE NO CICLO"*

73: $m_{\text{r}}=m_{\text{dot_r}}\text{tempo_ciclo}$

74:

75: *"CÁLCULO DA MASSA DE SÍLICA NECESSÁRIA"*

76: $m_{\text{s}}=m_{\text{r}}/(x_{\text{max}}-x_{\text{min}})$

77:

78: *"CÁLCULO DO VOLUME DE SÍLICA GEL"*

79: $V_{\text{s}}=m_{\text{s}}/\text{densidade_silica}$

80:

81: *"CÁLCULO DA ÁREA DO COLETOR SOLAR NECESSÁRIA"*

82: $A_{\text{coletor}}=Q_{\text{dot_adsorvedor}}/(I_{\text{solar}}\text{eficiencia_coletor})$

83:

84: *"DEFINIÇÃO DOS VETORES PARA PLOTAGEM DO DIAGRAMA DE CLAPEYRON (P vs. T)"*

85: $T_{\text{plot}[1]}=T[3]$

86: $T_{\text{plot}[2]}=T[4]$

87: $T_{\text{plot}[3]}=T[2]$

88: $T_{\text{plot}[4]}=T[1]$

89: $T_{\text{plot}[5]}=T[3]$

90:

91: P_plot[1]=P[3]
92: P_plot[2]=P[4]
93: P_plot[3]=P[2]
94: P_plot[4]=P[1]
95: P_plot[5]=P[3]

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, R. F. **Refrigeração Solar: Uma Proposta para a Refrigeração de Leite no Semi-árido Nordestino**. Recife: [s.n.].

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.

ARAÚJO, M. E. **VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM RESFRIADOR DE ÁGUA OPERANDO EM CICLO DE ADSORÇÃO COM AQUECIMENTO SOLAR INDIRETO**. Fortaleza: [s.n.].

BEZERRA, P. **Climatização residencial no Brasil: perspectivas futuras e o papel no planejamento do sistema**. Disponível em: <<https://ensaioenergetico.com.br/climatizacao-residencial-no-brasil-perspectivas-futuras-e-o-papel-no-planejamento-do-sistema/>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

BORG, M. A. et al. Occupational heat stress and economic burden: A review of global evidence. *Environmental Research*, v. 195, n. June 2020, p. 110781, 2021.

BRASIL, M. DE M. E E. **Atlas de Eficiência Energética Brasil 2022**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2022>>. Acesso em: 7 set. 2024.

BRASIL, M. DE M. E E. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020. EPE

CALVIN, Katherine et al. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. **(No Title)**, 2023.

CHUA, H. T. et al. Modeling the performance of two-bed, silica gel-water adsorption chillers. **International Journal of Refrigeration**, v. 22, n. 3, p. 194–204, maio 1999.

EES – ENGINEERING EQUATION SOLVER. Versão V10.561. Middleton: F-Chart Software, 2018. Software.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2023**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 10 set. 2024.

GEDIZ ILIS, G.; DEMIR, H.; SAHA, B. B. Innovative approach in adsorption chiller: Combination of condenser-adsorber for improving performance. *Applied Thermal Engineering*, v. 192, n. March, p. 116958, 2021.

HEBEDA, O. **EMISSÕES DE GASES FLUORADOS CAUSADORES DE EFEITO ESTUFA: DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA O BRASIL ATÉ 2050**. Rio de Janeiro: [s.n.].

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Cooling Opportunities for energy- efficient air conditioning**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>>. Acesso em: 10 set. 2024.

KELLY LEVIN. **Adaptação, Impacto das mudanças climáticas: 6 descobertas do relatório do IPCC de 2022 sobre**. Disponível em: <[https://www.wribrasil.org.br/noticias/impacto-das-mudancas-climaticas-6-descobertas-do-relatorio-do-ipcc-de-2022-sobre-adaptacao?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsPCyBhD4ARIsAPaaRf2RPZsFjDMZXeX6rEifGS9kfZID7BwJq-vhDnP4_PNF3psQzaAbdWiaAhZpEALw_wcB&utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Clima&utm_content=Impacto_das_mudancas_climaticas_6_descobertas_do_relatorio_do_IPCC_de_2022_sobre_adaptacao&utm_term=ipcc 2022](https://www.wribrasil.org.br/noticias/impacto-das-mudancas-climaticas-6-descobertas-do-relatorio-do-ipcc-de-2022-sobre-adaptacao?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsPCyBhD4ARIsAPaaRf2RPZsFjDMZXeX6rEifGS9kfZID7BwJq-vhDnP4_PNF3psQzaAbdWiaAhZpEALw_wcB&utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_campaign=Clima&utm_content=Impacto_das_mudancas_climaticas_6_descobertas_do_relatorio_do_IPCC_de_2022_sobre_adaptacao&utm_term=ipcc%2022)>. Acesso em: 20 out. 2024.

LEAH BURROWS. **In a hotter world, air conditioning isn't a luxury, it's a lifesaver**. Disponível em: <<https://seas.harvard.edu/news/2022/07/hotter-world-air-conditioning-isnt-luxury-its-lifesaver>>. Acesso em: 27 nov. 2024.

MAT WAJID, N. et al. **Solar adsorption air conditioning system – Recent advances and its potential for cooling an office building in tropical climate.** Case Studies in Thermal Engineering, v. 27, n. July, p. 101275, 2021.

MOTAMEDI, S. et al. **An Economic Investigation of a Solar-Powered Adsorption Cooling System.** ChemEngineering, v. 6, n. 5, p. 1–15, 2022.

O Brasil e a Proteção da Camada de Ozônio: uma parceria bem-sucedida entre governo, setor produtivo e sociedade. Disponível em: <<http://www.protocolodemontreal.org.br/site/quem-somos/protocolo-de-montreal/sobre-o-protocolo-de-montreal>>. Acesso em: 15 abr. 2020.

PALOMBA, V. et al. **Hybrid adsorption-compression systems for air conditioning in efficient buildings: Design through validated dynamic models.** Energies, v. 12, n. 6, 2019.

SHABIR, F. et al. **Investigation of carbon based adsorbents for the development of thermally-driven adsorption cooling systems.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 414, p. 012004, 13 set. 2018.

SHIRAZI, A. et al. **Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review.** Energy Conversion and Management, v. 171, n. May, p. 59–81, 2018.

YAÏCI, W.; ENTCHEV, E. **Coupled unsteady computational fluid dynamics with heat and mass transfer analysis of a solar/heat-powered adsorption cooling system for use in buildings.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 144, p. 1–17, 2019.

ZHAI, X. Q. et al. **Design and performance of a solar-powered air-conditioning system in a green building.** Applied Energy, v. 85, n. 5, p. 297–311, 2008.