

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SOLAR POR UM CICLO DE
ABSORÇÃO APLICADO A CÂMARAS FRIAS**

Por

Gustavo Lucas Höher

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, dezembro de 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO SOLAR POR UM CICLO DE
ABSORÇÃO APLICADO A CÂMARAS FRIAS

Gustavo Lucas Höher

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos

Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Letícia Jenisch Rodrigues

Banca examinadora:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos – DEMEC/UFRGS

Prof^a. Dr^a. Bibiana Ferraz – DELAE/UFRGS

Prof^a. Dr^a. Mariana Resener – DELAE/UFRGS

Porto Alegre, 04 de dezembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, César Henrique Höher e Vera Regina Lírio Höher, que me incentivaram e me apoiaram de todas as formas possíveis durante todo caminho da graduação, sempre acreditando nos meus objetivos. Agradeço aos meus irmãos, César Henrique Höher, Victor Radamés Höher e Werner Günther Höher, que estiveram presentes no meu caminho, ajudando e sendo figuras nas quais pude me inspirar a ser quem sou hoje.

Agradeço à orientadora Letícia Jenisch Rodrigues que esteve presente desde o início de meu caminho na universidade, apoiando e sendo um exemplo de professora com dedicação e discernimento. Agradeço aos demais professores e funcionários da UFRGS que deram seu máximo pelos alunos para garantir um ensino de qualidade.

Höher, G.L. **Análise de geração de energia por ciclo de absorção aplicado a câmaras frias**. 2021.30. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar um sistema de geração energia a partir de coletores solares térmicos que alimentam um ciclo de absorção produzindo frio para uma câmara fria. A análise técnica é feita através de simulações computacionais com o auxílio do *software Transient System Simulation Tool* (TRNSYS), no qual, é implementado o sistema de geração. Além da avaliação de produção térmica, é levado em conta o comportamento da câmara de acordo com a carga a ser refrigerada através do *software* de simulação *Energy Plus*. Esse sistema é implementado em diferentes regiões do Brasil com objetivo de avaliar a influência da irradiação solar na geração térmica e também sobre a carga térmica da câmara. Com essas informações, são denominados alguns parâmetros que mais influenciam na geração de energia e também na mudança da carga térmica da câmara. Para cada parâmetro escolhido é determinado um intervalo de operação e essas informações são aplicadas no *software MINITAB* com objetivo de avaliar através do método estatístico de *Box-Behnken*, que faz parte da análise de *Design of Experiments* (DoE), a fim de determinar número de experimentos a serem desenvolvidos nos softwares escolhidos. A partir dos resultados, é possível determinar os parâmetros que mais influenciam o sistema em questão e também quais se correlacionaram de forma mais acentuada. Através do gráfico de regressão é possível verificar que o modelo em questão segue um padrão de resultado esperado. Além disso, foi possível mapear as regiões brasileiras onde o sistema proposto seria melhor implementado.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar Térmica; Ciclo de absorção; Refrigeração; Câmaras Frias.

Höher, G.L. **Analysis of power generation by absorption cycle applied to cold rooms.** 2021.30. Monograph (Course Completion Work in Energy Engineering) - School of Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate an energy generation system from solar thermal collectors that feed an absorption cycle, producing cold for a cold chamber. The technical analysis is done through computer simulations with the help of the software Transient System Simulation Tool (TRNSYS), in which the generation system is implemented. Besides the evaluation of thermal production, the behavior of the chamber according to the load to be cooled is taken into account, through the simulation software Energy Plus. This system is implemented in different regions of Brazil, with the objective of evaluating the influence of solar irradiation on thermal generation and also on the thermal load of the chamber. With this information, some parameters that most influence the energy generation and also the change in the thermal load of the chamber are named. For each chosen parameter an operation interval is determined, and this information is applied to the MINITAB software in order to evaluate through the Box-Behnken statistical method, which is part of the Design of Experiments (DoE) analysis, in order to determine the number of experiments to be developed in the chosen software. From the results it is possible to determine the parameters that most influence the system in question and also which correlate more strongly. Through the regression graph it is possible to verify that the model in question follows a pattern of expected results. Furthermore, it was possible to map the Brazilian regions where the proposed system would be best implemented.

KEYWORDS: Thermal Solar Energy; Absorption Cycle; Refrigeration; Cold Rooms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coletor de placa plana.....	2
Figura 2 - Coletor parabólico composto.....	2
Figura 3 - Coletor solar de tubo evacuado.....	3
Figura 4 - Coletores parabólicos em calha.	3
Figura 5 - Representação do ciclo de absorção de simples efeito.....	4
Figura 6 - Representação do ciclo de absorção de duplo-efeito.	5
Figura 7 - Gráfico de resposta de superfície.....	6
Figura 8 - Fluxograma da metodologia aplicada.	6
Figura 9 - Energia Gerada Média Anual	10
Figura 10 - Fração Solar Média Anual.....	12
Figura 11 - Energia Gerada Anual Utilizando Módulo PTC.....	15
Figura 12 - Energia Gerada Anual Utilizando Módulo ETC.....	15
Figura 13 - Gráfico de Pareto para efeitos padronizados para energia gerada média anual.	16
Figura 14 - Gráfico de probabilidade normal para energia gerada média anual.....	16
Figura 15 - Gráfico de Resíduos x Valor ajustado.....	17
Figura 16 - Gráfico de resíduos x ordem de observação.	17
Figura 17 - Gráfico de Pareto para fração solar média anual.	18
Figura 18 - Gráfico de probabilidade normal para a fração solar média anual.....	18
Figura 19 - Gráfico de resíduos x valores ajustados.	19
Figura 20 - Gráfico de resíduos x ordem.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis do modelo.....	9
Tabela 2 - Análise de variância para energia gerada média anual	10
Tabela 3 - Nova análise de variância para energia gerada média anual	11
Tabela 4 - Equações de regressão para energia gerada média anual.....	11
Tabela 5 - Análise de variância para fração solar média anual.....	12
Tabela 6 - Coeficientes codificados para fração solar média anual	13
Tabela 7 - Nova análise de variância para fração solar média anual	13
Tabela 8 - Equações de regressão para fração solar média anual	14

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1	Coletores solares térmicos.....	1
2.2	Coletores de placa plana (FPC).....	2
2.3	Coletores parabólico composto (CPC).....	2
2.4	Coletores de tubo evacuado (ETC).....	3
2.5	Coletores concentradores parabólicos em calha (PTC)	3
2.6	Ciclo de refrigeração por absorção de simples efeito	4
2.7	Ciclo de refrigeração por absorção de duplo efeito (H ₂ O - LiBr).....	4
2.8	Método de <i>Box-Behnken</i>	5
3	METODOLOGIA DESENVOLVIDA	6
3.1	Levantamento da carga térmica.....	7
3.2	Modelo térmico utilizado.....	7
3.3	Aplicação do método de <i>Box-Behnken</i>	7
4	ESTUDO DE CASO E RESULTADOS.....	8
4.1	Estudo de Caso	8
4.1.1	<i>Energy Plus</i>	8
4.1.2	<i>Transient system simulation tool (TRNSYS®)</i>	8
4.1.3	Aplicação do Método Estatístico	9
4.2	Resultados	9
4.2.1	Energia Gerada Média Anual	9
4.2.2	Fração Solar Média Anual.....	11
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	14
5.1	Energia Gerada Média Anual.....	14
5.2	Fração Solar Média Anual	17
6	CONCLUSÃO	19
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21

1 INTRODUÇÃO

A energia é um dos grandes temas em discussão em diversos setores no mundo, não somente na questão de novas fontes de geração, mas também no desenvolvimento de meios sustentáveis e econômicos. O setor industrial representou aproximadamente 34,72% do total de consumo de energia no Brasil (EPE, 2019). Devido a isto, é de suma importância o desenvolvimento de pesquisa com foco em reduzir custos com este insumo. A refrigeração em sistemas industriais é um dos setores que contribui no consumo de energia elétrica e, isso se dá por conta das variações de condições climáticas. No caso do Brasil, essas alternâncias relacionadas ao clima são distintas de região para região. Em contrapartida, temos a disponibilidade inesgotável de fonte de irradiação proveniente do Sol tornando a energia solar cada vez mais popularizada e viável.

Por ser uma fonte limpa, se torna atrativa por não emitir gases de efeito estufa em seus processos de geração. De acordo com Frozza (2013), o consumo de energia elétrica devido a refrigeração em câmaras frias pode variar em torno de 81 %. Por este motivo, o estudo de meios de produção de energia por meio de fontes renováveis se torna pertinente para esses fins. A utilização de sistemas de condicionamento solar de ambientes e em nível industrial vem crescendo atualmente no mundo (SOLID, 2014). Vale destacar que uma das maiores obras existentes está localizada em Singapura com capacidade de 2,73 MW_{th}. Além disso, no ano de 2019, projetos de média e larga escala foram desenvolvidos principalmente na Europa. No entanto, a utilização desses meios de produção de energia totaliza 2000 projetos instalados no mundo todo (SOLID, 2020).

Para Cascetta (CASCETTA et al., 2018), a vantagem de utilizar energia solar térmica em sistemas de refrigeração se dá ao fato de ambos, o Sol e a demanda de resfriamento no verão, serem maiores. Em câmaras frias os gastos com energia se tornam exorbitantes, principalmente no verão. Sendo assim, uma alternativa seria a utilização da energia proveniente do Sol que é uma opção que está disponível de forma gratuita. Em alguns estados do Brasil, como os da região norte e nordeste, possuem temperaturas elevadas o ano todo e incidência solar muito alta. Para isso, esse sistema será avaliado como uma opção de geração de energia limpa e econômica para a indústria.

Com isto, a presente monografia tem como objetivo avaliar o desempenho termo energético do modelo sugerido, aplicado a diferentes cidades do Brasil. Baseado nisso, será analisada a geração de energia a partir de coletores solares térmicos que utilizam o calor provido da radiação solar para aquecer um determinado fluido (água, ar, entre outros). Esse fluido quente alimentará um *chiller* que irá gerar frio. Segundo Barreto (2018), existem diversos processos que podem se utilizar da irradiação como de produção de refrigeração, no entanto para cada aplicação irá depender da demanda de refrigeração da forma da energia de entrada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentado os termos estudados que serviram como base para esta análise.

2.1 Coletores solares térmicos

São equipamentos que transformam a energia proveniente do Sol em energia térmica através de um fluido de transporte. Este sistema absorve a radiação solar, converte essa energia em calor e transfere-o para um fluido que pode ser água, ar ou óleo. Os coletores podem ser classificados como não concentradores ou estacionários e concentradores. Os coletores não concentradores possuem uma mesma área que recebe e absorve a radiação solar. Já o coletor concentrador intercepta a radiação solar por meio de superfícies côncavas e focaliza a radiação solar direta para uma área menor.

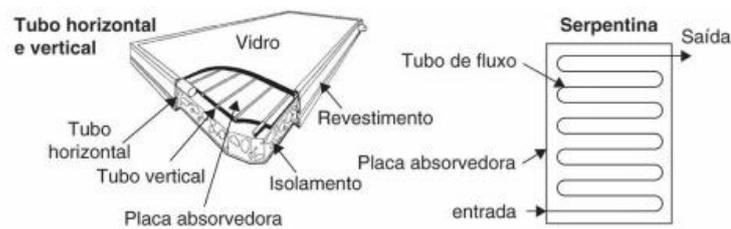
Quanto à aplicação, os coletores concentradores são indicados para processos que operem em altas temperaturas. Estes equipamentos também podem ser diferenciados quanto ao líquido utilizado na

transferência de calor (água, líquido não congelante, ar ou óleo de transferência de calor). Atualmente existem diversos modelos de coletores solares térmicos disponíveis no mercado.

2.2 Coletores de placa plana (FPC)

A placa plana é constituída por uma superfície de vidro que é sobreposta a uma superfície absorvedora que é caracterizada por ter uma alta absortividade. Quando sob exposição à radiação solar uma grande parte da energia é absorvida pela placa e transferida para o fluido de trabalho que circula em tubos que direciona-os para um local de armazenamento ou uso. Um exemplo deste sistema está representado pela Figura 1.

Figura 1 - Coletor de placa plana.

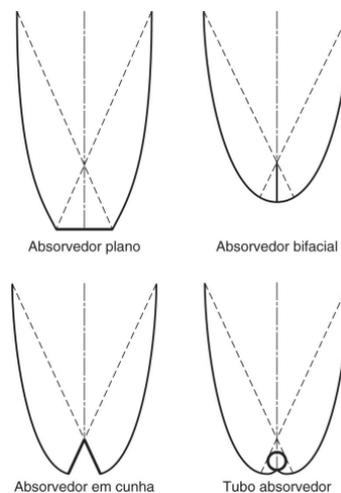


Fonte: (KALOGIROU, 2014)

2.3 Coletores parabólico composto (CPC)

São chamados de concentradores não espelhados. Têm a capacidade de refletir para o absorvedor toda radiação incidente, pois pode recebê-la por uma ampla gama de ângulos. Nesse caso, por trabalhar com múltiplas reflexões internas, qualquer radiação que entra na abertura do aceitador do coletor pode tomar diferentes configurações. Na Figura 2 temos a representação dos diferentes formatos de coletores parabólicos compostos.

Figura 2 - Coletor parabólico composto.

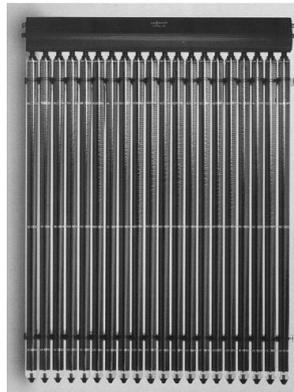


Fonte: (KALOGIROU, 2014)

2.4 Coletores de tubo evacuado (ETC)

Os coletores de tubo evacuado podem operar com maior desempenho e durabilidade em dias frios, nublados ou com vento. São constituídos por um tubo de calor situado na parte interna de um tubo evacuado. Na superfície interna do tubo interno é posicionada uma superfície absorvedora. A escolha dessa localização faz com que as perdas de calor devido à convecção e à condução sejam menores com o meio externo. Na Figura 3 há uma representação desse modelo de coletor.

Figura 3 - Coletor solar de tubo evacuado.



Fonte: (KALOGIROU, 2014)

2.5 Coletores concentradores parabólicos em calha (PTC)

São indicados para processos que envolvam temperaturas até 400°C. Este coletor é constituído por uma folha de um material reflexivo entornado em uma forma parabólica. Ao longo da linha focal do receptor desse material parabólico é posicionado um tubo de metal preto coberto de vidro, que tem como objetivo receber a radiação solar incidente. O tubo utilizado possui formato evacuado para que as perdas de transferência de calor sejam reduzidas. A radiação incidente no tubo aquece um fluido que circula através dele. Pelas propriedades ópticas a linha focal é fixa, isso faz com que a radiação incidente também seja fixa na direção do refletor. Para otimizar o processo de geração são instalados sistemas de rastreamento solar. Na Figura 4 há uma representação desse formato de coletor.

Figura 4 - Coletores parabólicos em calha.



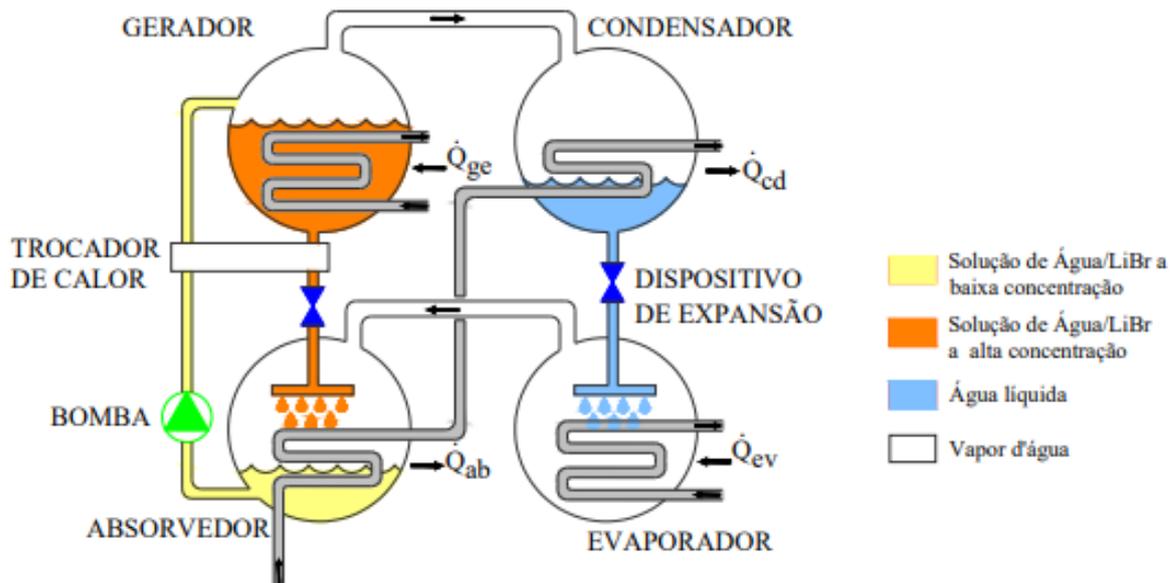
Fonte: (HO, 2007)

2.6 Ciclo de refrigeração por absorção de simples efeito

De acordo com Carvalho (2007), é um sistema constituído por gerador, evaporador, absorvedor, condensador e uma bomba de solução. Seu funcionamento é dado da seguinte forma: após a saída do líquido refrigerante do evaporador na forma de vapor e à baixa pressão, esta é absorvida por uma solução líquida no absorvedor. No processo de absorção, ocorre uma reação exotérmica, que necessita do resfriamento absorvedor por meio de ar ou água. A bomba recebe a solução a baixa pressão e baixa concentração do absorvedor, eleva a sua pressão transportando-a para o gerador. No gerador, o calor provido de uma fonte quente de alta temperatura, faz com que a água seja vaporizada pela solução que a absorve. A solução líquida a alta concentração retorna para o absorvedor passando por redutor de pressão para que ocorra diferença de pressão entre o gerador e o absorvedor.

O vapor d'água que é liberado da solução líquida é utilizado como fluido refrigerante no condensador, no qual, ocorrerá nova troca de calor. O refrigerante na forma líquida passará por um dispositivo que reduzirá sua pressão a um nível muito baixo antes de chegar ao evaporador. O fluido refrigerante a pressão baixa escoará sobre a tubulação de troca de calor do evaporador, na qual, o calor latente será o responsável pela geração do efeito refrigerante desejado. A forma de vapor será absorvida pela solução líquida no absorvedor, completando o ciclo. Na Figura 5 há um esquema do circuito descrito.

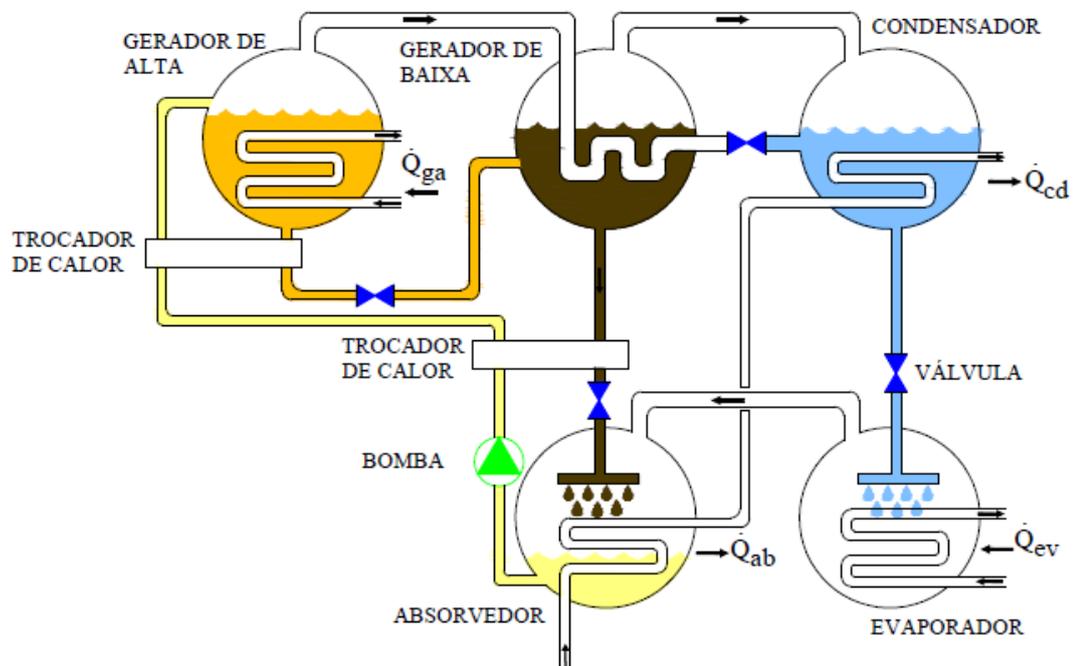
Figura 5 - Representação do ciclo de absorção de simples efeito.



2.7 Ciclo de refrigeração por absorção de duplo efeito (H₂O - LiBr)

O ciclo de absorção de duplo efeito possui coeficiente de desempenho em torno de 1,7. Por outro lado, o ciclo de simples efeito tem valores por perto de 0,7. Isto torna mais vantajoso a utilização dos ciclos de duplo efeito. Este ciclo pode operar com fontes quentes de calor de maior temperatura (120 °C). A presença de um segundo gerador, de baixa temperatura, produz um melhor aproveitamento do calor da fonte quente. Na Figura 6, é ilustrada a estrutura do ciclo em questão.

Figura 6 - Representação do ciclo de absorção de duplo-efeito.



Fonte: (CARVALHO, 2007)

A principal diferença desse ciclo com relação ao anterior é a presença do segundo gerador, que será aquecido com a pressão fornecida do primeiro gerador. Este ciclo opera em três níveis de pressão e com dois circuitos distintos como no ciclo de simples efeitos, um de solução ($\text{H}_2\text{O-LiBr}$) e o outro do refrigerante (H_2O). Contudo, possui um nível de concentração da solução $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ intermediário entre a solução diluída que sai do absorvedor e a solução que sai a alta concentração de LiBr que chega do mesmo.

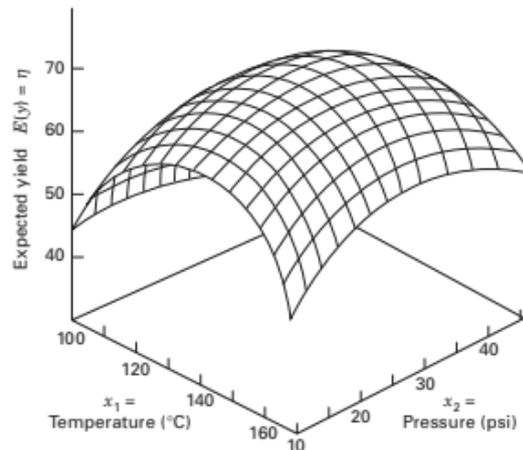
O processo começa da seguinte maneira: após a saída do refrigerante do evaporador na forma de vapor, esse é absorvido pela solução de $\text{H}_2\text{O-LiBr}$. No absorvedor ocorre uma reação exotérmica do vapor d'água e a solução em questão - o resfriamento do absorvedor é feito através de água ou ar. A pressão do absorvedor é elevada até a entrada no gerador de alto que aquecerá a solução e desprenderá vapor d'água e este será responsável pelo aquecimento do gerador de baixa. A solução será aquecida neste gerador de uma concentração intermediária até uma alta concentração, após, essa retornará para o absorvedor na forma diluída, porém, antes passará pelo redutor de pressão. O vapor d'água liberado do gerador de alta e baixa é levado para o condensador como no ciclo de simples efeito.

Um dos maiores gastos nos ciclos de absorção está relacionada ao aquecimento do gerador e o resfriamento do absorvedor. Para isso, são utilizados trocadores de calor com o intuito de resfriar a solução que vai para o absorvedor e aquecer a solução com destino aos geradores.

2.8 Método de *Box-Behnken*

O *Box-Behnken* é um dos métodos mais usuais na análise de *Design of Experiments* (DoE). Por ser um método da classe de resposta de superfície, o é expresso através de uma superfície característica (MONTGOMERY, 2012). Esta superfície é plotada a partir da relação dos parâmetros escolhidos com a saída desejada. Essa analogia é ilustrada pela Figura 7.

Figura 7 - Gráfico de resposta de superfície.



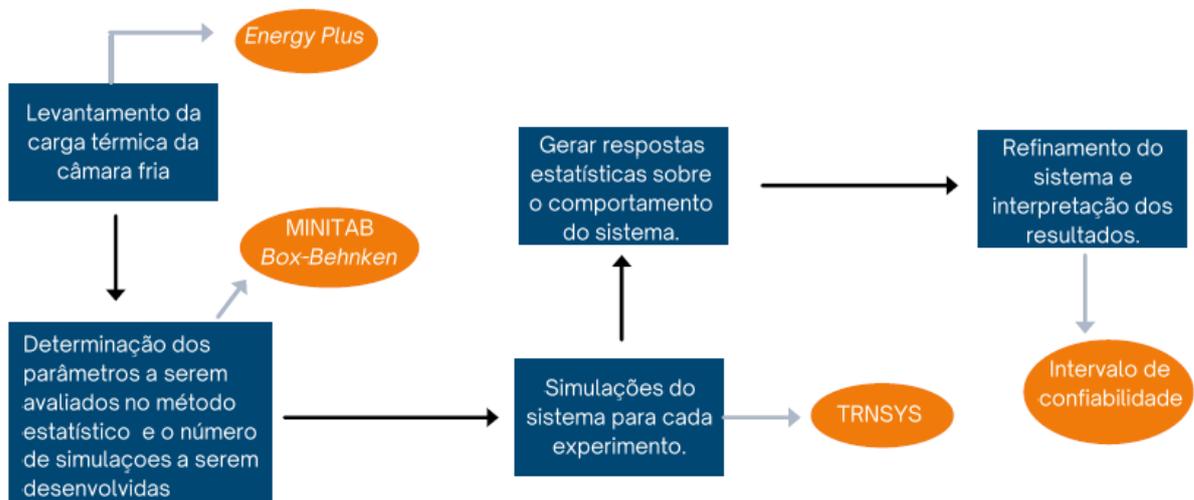
Fonte: (MONTGOMERY, 2012)

Os parâmetros exemplificados são a temperatura e pressão, sendo a saída a superfície (plano) resultante. No caso do uso do método *Box-Behnken*, esses parâmetros nunca são avaliados em seus extremos (inferior e superior) num mesmo experimento, ou seja, cada um é avaliado em um experimento diferente. Essa característica torna o projeto mais econômico. Além disso, o método requer poucos cálculos e reduz o número de experimentos necessários.

3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Descreve-se a seguir a forma pela qual foi desenvolvido o trabalho com o intuito de alcançar os objetivos propostos. A partir da Figura 8, temos o seguimento da metodologia seguida.

Figura 8 - Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Autor.

3.1 Levantamento da carga térmica

A câmara fria em questão possui três unidades, sendo a R/06 e R/07 com dimensão de 11,33 x 9,28 x 5,50 m e a R/08 com dimensão de 16,73 x 7,03 x 5,50 m. A ideia principal é contabilizar as cargas térmicas por meio de sua implementação no *software* de simulação *Energy plus*. Considerando que a temperatura de operação da câmara é 0°C, a principal parcela de carga térmica é dada pelo produto, o qual queremos manter refrigerado. O cálculo é dado pela seguinte equação de Borgnakke (1998):

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Nesta equação, m é a massa a do produto a ser refrigerado, c_p é o calor específico do produto e ΔT é a diferença de temperatura dada pela carga antes de ser refrigerada e após atingir a temperatura desejada.

Outra parcela importante a ser considerada é o calor que adentra através das paredes, pisos e teto. Esse calor é calculado de acordo com índice de irradiação solar do local no qual a câmara está. Essas informações são retiradas através dos arquivos climáticos de cada região ou cidade. O *software* de simulação leva em conta também as características dos materiais da edificação a ser simulada, como material de construção utilizados nas paredes e pisos, presença de isolamento das paredes, teto e piso.

Além do mais, é levado em conta o ar externo que adentra as câmaras fazendo que ocorra ganho de carga térmica. Outras cargas que devem ser consideradas são provenientes dos motores dos equipamentos, sistemas de iluminação e também das pessoas que trabalham nas câmaras fazendo o carregamento das mesmas. Com todas essas informações, pode-se obter o perfil de carga térmica necessária a ser mantida no local e a energia necessária de refrigeração para mantê-la na temperatura desejada.

3.2 Modelo térmico utilizado

O ciclo proposto é composto por brometo de lítio (LiBr) que é utilizado como absorvedor e água. Esse sistema chamado de absorção é simulado em dado intervalo de tempo com o objetivo de suprir a carga térmica da câmara fria. O sistema de aquecimento solar em questão, baseado do ciclo de absorção utilizando *chiller* de 150 kW é simulado através do *software* *TRNSYS*. Através dos dados climáticos de uma cidade escolhida e atendo a área de coletores simulados por Cascetta (CASCETTA et al., 2018).

Um tanque frio e um tanque quente também são considerados. O tanque quente é estratificado com perdas uniformes e com múltiplas divisões, nas quais são feitos balanços de energia do tanque com relação ao tempo. A água que serve para abastecer o *chiller* entra no tanque pela divisão superior e sai pela divisão inferior do mesmo. O tanque quente é equipado também com um sistema auxiliar de aquecimento dado por um boiler que é ativado quando a temperatura do fluido fica abaixo da temperatura de operação do tanque. O calor necessário para aquecer o fluido da temperatura de entrada a temperatura de saída do tanque é dado por \dot{Q} em função da vazão mássica da água e o calor específico da mesma.

$$\dot{Q} = \dot{m}_a \cdot c_{p,a} \cdot (T_{a,saída} - T_{a,entrada}) \quad (3.2)$$

O tanque frio é constituído de material rochoso que possui baixa capacidade térmica relativa. Utilizando as *types* do trabalho citado acima é possível obter a energia produzida pelo ciclo de absorção para suprir a demanda térmica da câmara através das simulações realizadas.

3.3 Aplicação do método de *Box-Behnken*

Por meio do entendimento do problema em questão, que será o uso da energia solar para produção de energia através do ciclo de absorção com relação à carga térmica da câmara, pode se avaliar quais aspectos têm maior influência no modelo desenvolvido. Com o auxílio do *software* MINITAB que

utiliza métodos estatísticos de DOE aplicando-os e, assim, resolvendo as interações do modelo desenvolvido de acordo com o método escolhido. Através desse programa, é possível fazer previsões de comportamento do modelo e correlações entre as variáveis escolhidas (MINITAB, 2017).

O primeiro passo a ser desenvolvido para aplicação do método de *Box-Behnken* é determinar quais variáveis do modelo estudado contribuem para geração de energia através do ciclo ou na carga térmica da câmara. Essas variáveis podem ser classificadas em contínuas ou categóricas. O intervalo contínuo é denominado por uma quantidade de valores que pode variar de x a y . Em contrapartida, o intervalo categórico denomina, não um valor, mas sim uma categoria ou classe de uma certa variável que não pode ser quantizada.

Um dos resultados a analisar pelo modelo é a equação característica que rege o sistema. Nesse modelo, por se tratar de uma superfície de resposta, a mesma é dada por um termo quadrático, ou seja, uma equação polinomial do tipo:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i > j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.3)$$

na qual os coeficientes β expressam a relação entre as entradas e a saída. O produto de termos x_i e x_j representa a relação entre as entradas.

Pode-se também observar que muitos termos não são de grande influência para a saída. Dependendo do Grupo de estudo, um dado intervalo de confiabilidade é gerado. A solução é dada por uma tabela de regressão e para respeitar o intervalo de confiabilidade, o termo *P-Value* deve estar abaixo de 0,05. Caso os valores estejam acima desta ordem, a dada interação não é relevante para o modelo. Desta maneira, devem ser descartados primeiramente as interações de maior ordem com *P-Value* mais alto, e assim sucessivamente. Finalizando esta parte, o modelo refinado estará em seu estado final. Outro parâmetro que deve ser avaliado é o R2, que deve ter seu valor mais próximo possível de 1. Isto pode ser observado ao retirarmos os termos de menor significância.

4 ESTUDO DE CASO E RESULTADOS

Nesta seção será apresentado os softwares escolhidos na análise e também os resultados obtidos.

4.1 Estudo de Caso

4.1.1 *Energy Plus*

Este *software* parte da construção da estrutura física de uma edificação ou sistema escolhido pelo usuário. A premissa do programa é selecionar o arquivo climático desejado, esse passo é importantíssimo para determinação da carga térmica do problema, visto que, o *software* irá se basear nos dados de irradiação solar do local escolhido pelo usuário. Na interface do programa é possível determinar os parâmetros construtivos do sistema como materiais utilizados na construção de uma dada edificação, isolamento térmico, concreto, laje, etc. (ASHTON, 2004). No *Energy Plus* é possível também determinar os equipamentos que estão no sistema simulado, como motores, bombas e turbinas. O programa resolve as equações de derivadas parciais convergindo para um resultado da possível carga térmica que o sistema possui.

4.1.2 *Transient system simulation tool (TRNSYS®)*

Para Klein (2021), este é um *software* utilizado para simulação de sistemas de energia térmica no regime transiente, relacionando variáveis de entrada e saída através da seleção dos componentes do conjunto em questão chamando de *types*. As conexões necessárias do conjunto são escolhidas pelo usuário de acordo com os parâmetros determinados. Para soluções de cada

sistema, essa ferramenta apoia-se nos dados climáticos da localização escolhida pelo usuário. Para resolução de problemas mais específicos, é possível inclusão de modelos matemáticos que não estão presentes na biblioteca do programa. Por intermédio da resolução de equações diferenciais, o programa gera seus resultados assegurando uma convergência de acordo com o intervalo tempo escolhido.

4.1.3 Aplicação do Método Estatístico

As variáveis escolhidas foram azimute, inclinação e área, como parâmetros contínuos e tipo de módulo e a cidade na qual o modelo seria simulado, sendo esses os parâmetros categóricos. As variáveis ditas como contínuas, foram escolhidas por se tratar de aspectos físicos relacionados aos cálculos dos resultados deste trabalho. Os tipos de módulos foram escolhidos por serem os módulos mais aplicados a esse tipo de sistemas, levando em conta Cascetta (2018). Ao passo que, as cidades foram escolhidas no sentido de mapear diferentes regiões brasileiras nas quais possuíam diferentes características de incidência solar. Na figura abaixo é possível verificar os parâmetros escolhidos e seus respectivos intervalos no caso dos contínuos e a sua classificação no caso dos categóricos.

Tabela 1 - Variáveis do modelo.
VARIÁVEIS CONTÍNUAS

VARIÁVEIS	Intervalo
AZIMUTE	-135° - 135°
INCLINAÇÃO	10° - 40°
ÁREA	100 m ² – 300 m ²
VARIÁVEIS CATEGÓRICAS	
VARIÁVEIS	Categoria
MÓDULO	ETC [1]
	PTC [2]
CIDADE	Campo Grande [1]
	Florianópolis [2]
	Fortaleza [3]
	Manaus [4]
	Porto Alegre [5]
	Recife [6]

Fonte: Autor.

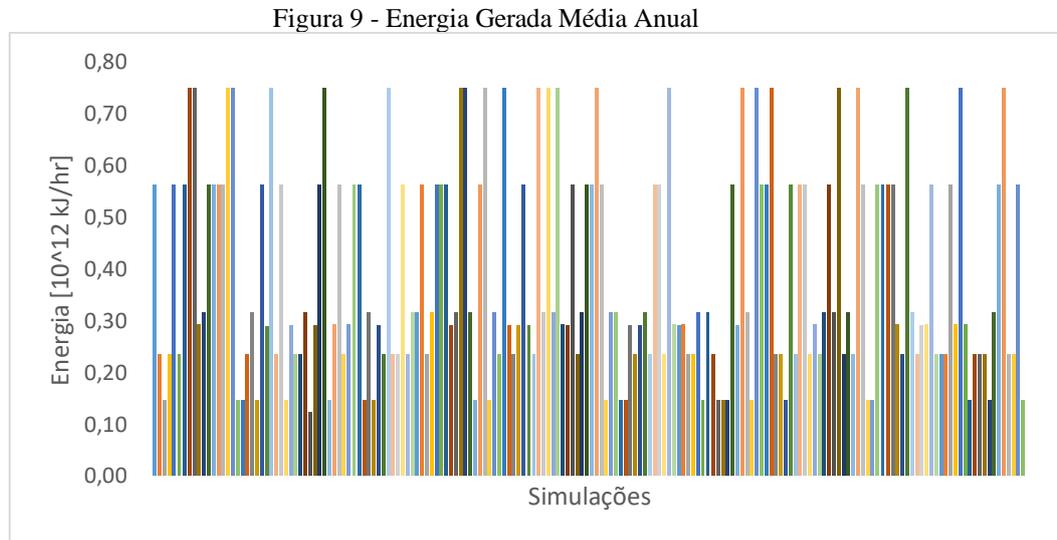
Na tabela acima temos, nos colchetes, os parâmetros categóricos com distinção numérica, que foi a forma aplicada no *software* MINITAB para que fosse possível identificar qual categoria utilizar em cada simulação.

4.2 Resultados

4.2.1 Energia Gerada Média Anual

No primeiro momento foi realizada a compilação no *software* MINITAB para os parâmetros escolhidos com o intuito de obter como resultado a energia gerada anual. Foram realizados os experimentos exigidos pelo software variando os parâmetros seguindo o método

de *Box-Behenken*. Ao total foram realizadas 180 simulações contemplando a variação aleatória dos parâmetros. Na Figura 8 é apresentado o valor de energia gerada média anual para cada simulação.



Fonte: Autor.

Avaliando os resultados para o resultado *P-value* no primeiro momento, tem-se os seguintes resultados no quadro a seguir quanto a análise de variância.

Tabela 2 - Análise de variância para energia gerada média anual

Fonte	GL	Valor-P
Modelo	38	0,000
Linear	9	0,000
Azimute	1	1,000
Inclinação	1	0,997
Área	1	0,000
Módulos	1	0,000
Cidades	5	1,000
Quadrado	3	0,000
Azimute*Azimute	1	0,983
Inclinação*Inclinação	1	0,991
Área*Área	1	0,000
Interação com 2 Fatores	26	0,000
Azimute*Inclinação	1	1,000
Azimute*Área	1	1,000
Azimute*Módulos	1	1,000
Azimute*Cidades	5	1,000
Inclinação*Área	1	0,996
Inclinação*Módulos	1	0,997
Inclinação*Cidades	5	1,000
Área*Módulos	1	0,000
Área*Cidades	5	1,000
Módulos*Cidades	5	1,000

Fonte: Autor.

Observando os resultados, tem-se que os parâmetros puros e também as relações de primeira e segunda ordem possuem valores significantes de *P-value*. Para tornar o modelo mais refinado e objetivo, foi adotada a limitação de intervalo de confiabilidade de 0,05. Após o descarte dos termos que não têm significância para o modelo, tem-se os seguintes resultados para a análise de variância.

Tabela 3 - Nova análise de variância para energia gerada média anual

Fonte	GL	Valor-P
Modelo	4	0,000
Linear	2	0,000
Área	1	0,000
Módulos	1	0,000
Quadrado	1	0,000
Área*Área	1	0,000
Interação com 2 Fatores	1	0,000
Área*Módulos	1	0,000

Fonte: Autor.

Outro resultado a ser apresentado são as equações de regressão do modelo. No modelo estudo temos duas equações, uma para representar o primeiro módulo (ETC) e o segundo (PTC).

Tabela 4 - Equações de regressão para energia gerada média anual

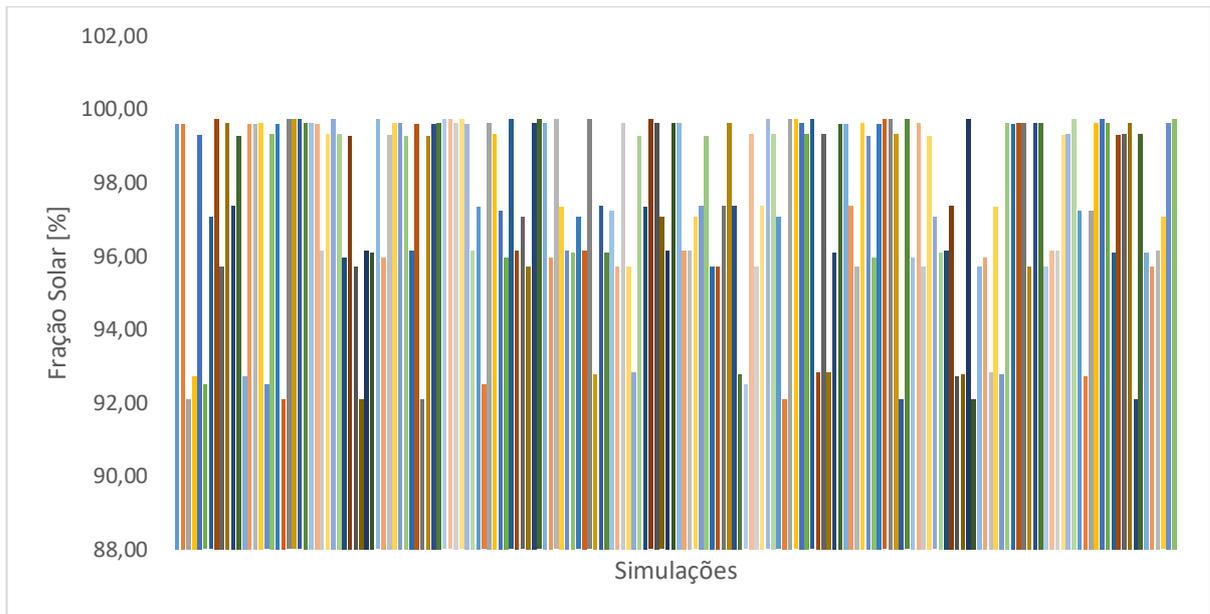
Módulos			
1	Energia Gerada Média Anual	=	$0,3713 + 0,030439 \text{ Área} - 0,000022 \text{ Área*Área}$
2	Energia Gerada Média Anual	=	$0,0421 + 0,016057 \text{ Área} - 0,000022 \text{ Área*Área}$

Fonte: Autor.

4.2.2 Fração Solar Média Anual

Outra análise realizada foi implementando o mesmo modelo com os mesmos dados no MINITAB, com intuito de obter a fração solar do modelo. Foram realizadas 180 simulações variando os parâmetros de forma aleatória, segundo o *software*. A partir disso temos o valor de fração solar média anual para cada simulação.

Figura 10 - Fração Solar Média Anual



Fonte: Elaborado pelo autor

Seguindo para a análise de variância teremos os seguintes resultados com relação ao valor de *P-value*.

Tabela 5 - Análise de variância para fração solar média anual

Fonte	GL	Valor-P
Azimute	1	1,000
Inclinação	1	1,000
Área	1	0,000
Módulos	1	0,000
Cidade	5	0,000
Quadrado	3	0,000
Azimute*Azimute	1	0,969
Inclinação*Inclinação	1	0,969
Área*Área	1	0,000
Interação com 2	26	0,000
Fatores		
Azimute*Inclinação	1	1,000
Azimute*Área	1	1,000
Azimute*Módulos	1	1,000
Azimute*Cidade	5	1,000
Inclinação*Área	1	1,000
Inclinação*Módulos	1	1,000
Inclinação*Cidade	5	1,000
Área*Módulos	1	0,000
Área*Cidade	5	0,766
Módulos*Cidade	5	0,001

Fonte: Autor.

Refinando o modelo a partir do intervalo de confiabilidade, pode-se chegar aos dados resultados abaixo para os coeficientes codificados e a análise de variância. Primeiramente temos os resultados para os coeficientes codificados.

Tabela 6 - Coeficientes codificados para fração solar média anual

Termo	Valor-P
Constante	0,000
Área	0,000
Módulos	
1	0,000
Cidade	
1	0,968
2	0,273
3	0,031
4	0,037
5	0,126
Área*Módulos	
1	0,000

Fonte: Autor.

Agora os novos resultados para análise de variância após aplicação de intervalo de confiabilidade.

Tabela 7 - Nova análise de variância para fração solar média anual

Fonte	GL	Valor-P
Área	1	0,000
Módulos	1	0,000
Cidade	5	0,027
Interação com 2 Fatores	1	0,000
Área*Módulos	1	0,000

Fonte: Autor.

Com os resultados de variância do modelo, foi possível obter as equações de regressão. Percebe-se aqui a dependência da fração solar para o parâmetro cidade.

Tabela 8 - Equações de regressão para fração solar média anual

Módulos	Cidade			
1	1	FS	=	99,139 + 0,002083 Área
2	1	FS	=	90,636 + 0,023675 Área
1	2	FS	=	99,218 + 0,002083 Área
2	2	FS	=	90,714 + 0,023675 Área
1	3	FS	=	98,993 + 0,002083 Área
2	3	FS	=	90,489 + 0,023675 Área
1	4	FS	=	98,998 + 0,002083 Área
2	4	FS	=	90,494 + 0,023675 Área
1	5	FS	=	99,248 + 0,002083 Área
2	5	FS	=	90,744 + 0,023675 Área
1	6	FS	=	99,258 + 0,002083 Área
2	6	FS	=	90,755 + 0,023675 Área

Fonte: Autor.

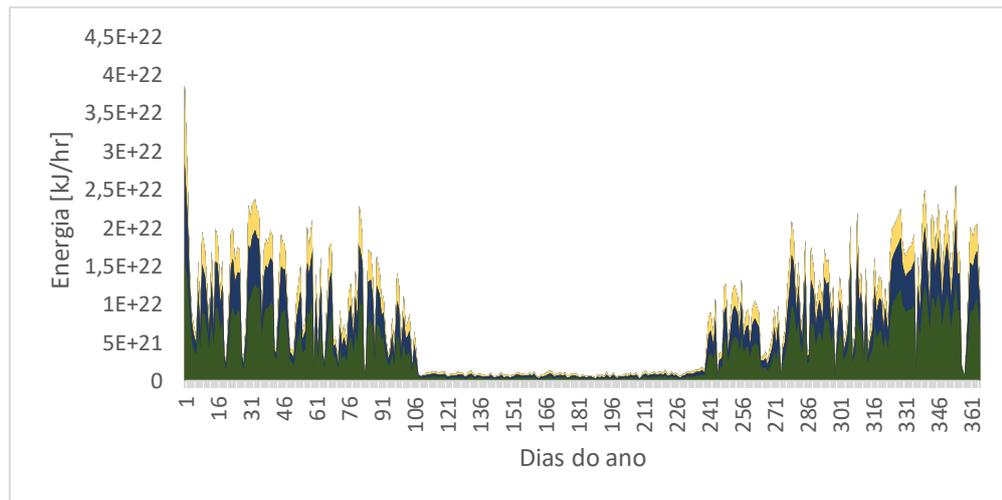
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta seção foi dividida em dois tópicos, sendo o primeiro com relação à geração de energia média anual e no segundo momento para a fração solar média anual.

5.1 Energia Gerada Média Anual

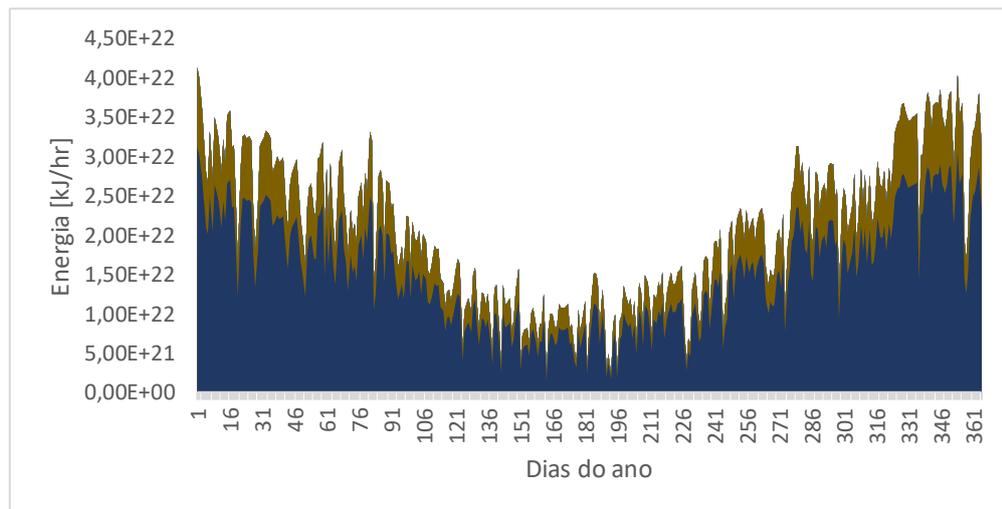
O modelo implementado com objetivo da análise de geração de energia exprime diversos fatores a serem analisados. Primeiramente, percebe-se o perfil de geração média anual que está sendo representado no gráfico abaixo para os dois tipos de módulos para as diferentes cidades.

Figura 11 - Energia Gerada Anual Utilizando Módulo PTC.



Fonte: Autor.

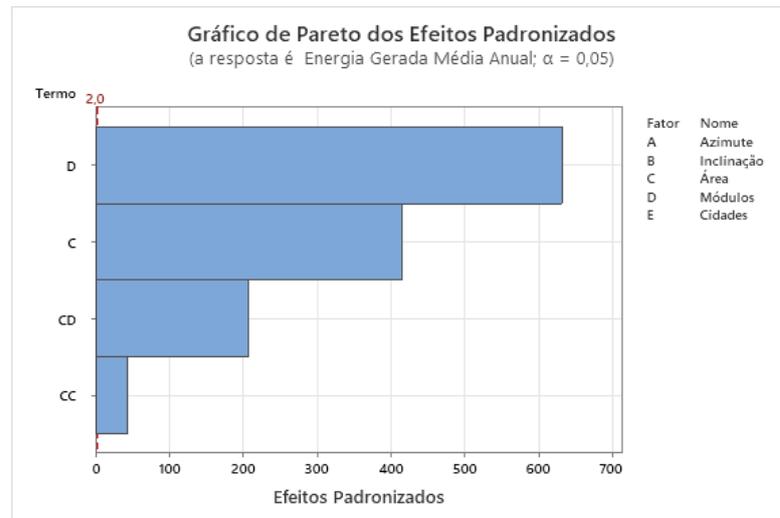
Figura 12 - Energia Gerada Anual Utilizando Módulo ETC.



Fonte: Autor.

Os gráficos representam uma justificativa de porque o modelo imprime uma relação significativa do tipo de módulo com a energia gerada independente da cidade na qual o sistema foi simulado, a partir das equações de regressão. Entretanto, por meio dos resultados percebe-se que o parâmetro que mais influenciou na energia média anual gerada foi a área do conjunto de módulos. Tanto pelas equações de regressão quanto pela análise de variância. Outra forma de analisarmos os resultados é através dos gráficos que o *software* imprime, sendo um deles o gráfico de Pareto.

Figura 13 - Gráfico de Pareto para efeitos padronizados para energia gerada média anual.



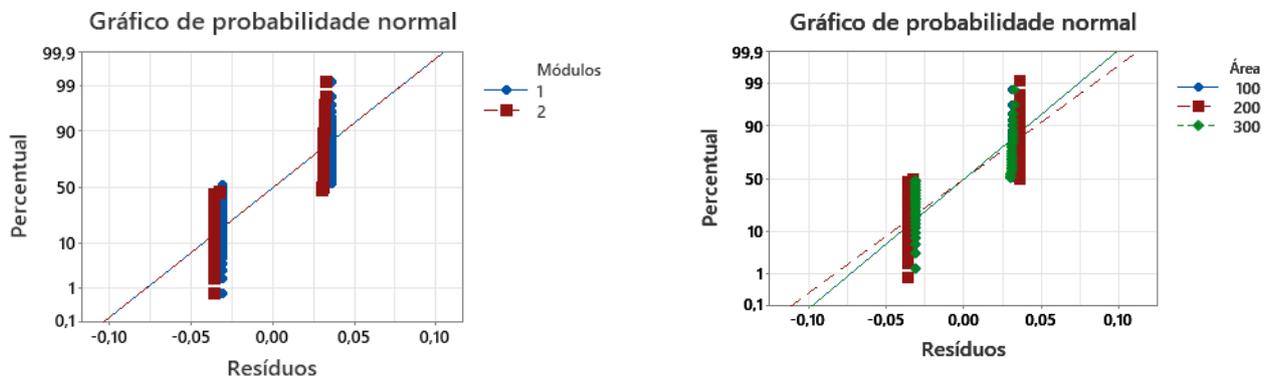
Fonte: Autor.

O gráfico de Pareto acima demonstra quais fatores têm significância para variação da resposta desejada. No caso dessa análise observa-se que o parâmetro módulo tem grande influência no modelo descrito, seguido pela área e as interações como módulos \times área e área \times área. A variável α descrita no gráfico é utilizada para determinar a linha de referência, na qual pode-se considerar se o fator tem significância para análise. (MINITAB, 2019a)

Outros parâmetros importantes a serem observados como resposta do modelo são o R^2 de 99,97%, R^2_{Predito} de 99,95% e R^2_{Ajustado} de 99,96%, sem ser aplicado o intervalo de confiabilidade de 0,05. Após realizado o refinamento do modelo com intuito de obter a geração de energia os valores obtidos para os mesmos termos citados anteriormente foram de 99,97%. Quanto ao R^2 , isso significa que as respostas obtidas pela aplicação do modelo têm seus dados bem ajustados. O R^2_{Predito} , garante que se fosse removida alguma informação da equação de regressão, o quão o modelo é capaz de prever a informação retirada. Através do R^2_{Ajustado} , pode-se perceber que após ser removido os termos que não tinham tanta importância para o estudo, pelo intervalo de confiabilidade, o modelo ficou mais objetivo. (MINITAB, 2019c)

Outra maneira de validar o modelo de estudo é através da interpretação dos gráficos de resíduos fornecidos pelo *software* MINITAB. O primeiro gráfico a ser analisado é o de probabilidade normal \times resíduos apresentado abaixo.

Figura 14 - Gráfico de probabilidade normal para energia gerada média anual



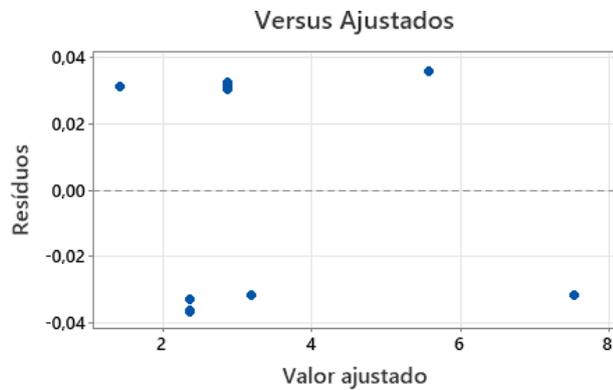
Fonte: Autor.

As figuras acima indicam dois padrões de tendência. Esses padrões estão localizados em locais diferentes do gráfico. As variações em torno da linha de tendência vermelha indicam que a resposta

desejada varia significativamente com o tipo de módulo escolhido e também com a área do conjunto de módulos empregada. A distribuição indica que os resíduos não seguem uma normalidade, e isso acontece pelo fato de o tipo de módulo influenciar nas respostas desejadas. (MINITAB, 2019b)

Outro gráfico a ser analisada é a de resíduos x valor ajustado, que é apresentado a seguir.

Figura 15 - Gráfico de Resíduos x Valor ajustado

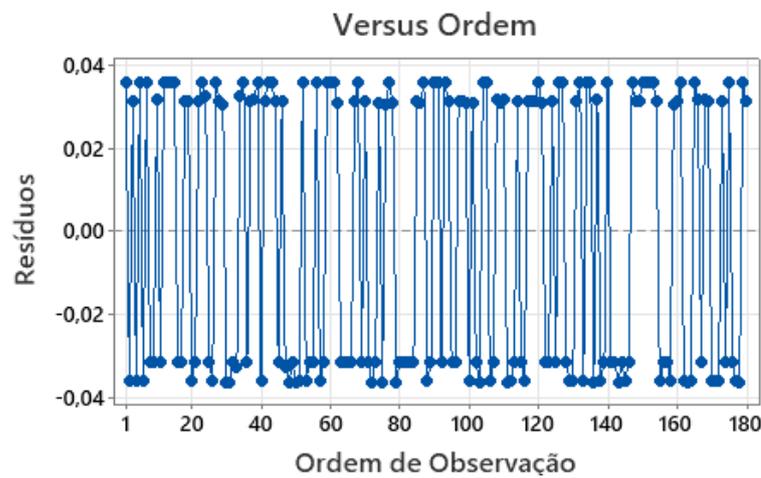


Fonte: Autor.

Na situação apresentada acima temos que os pontos estão distribuídos aleatoriamente em torno de 0. Isso indica que os resíduos são aleatoriamente distribuídos e que possuem variância constante. (MINITAB, 2019b)

O próximo gráfico a ser analisado é o de Resíduos x Ordem de apresentação.

Figura 16 - Gráfico de resíduos x ordem de observação.



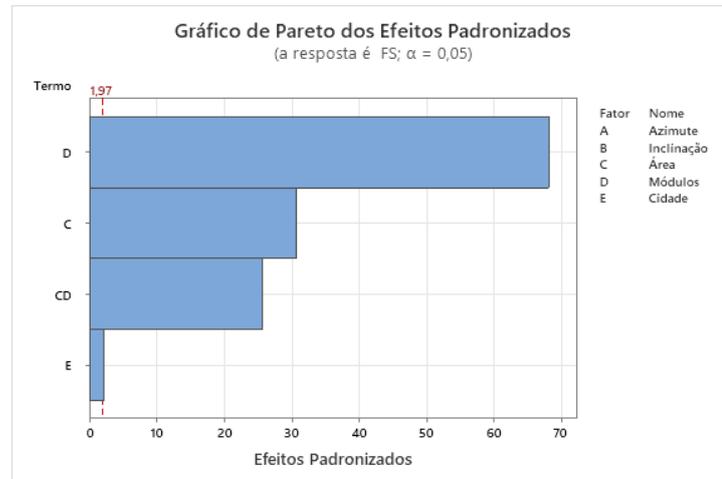
Fonte: Autor,

Em suma, se os pontos do gráfico acima estiverem dispostos em torno de zero, isso indica que os resíduos são independentes uns dos outros. (MINITAB, 2019b)

5.2 Fração Solar Média Anual

Começando pela análise do gráfico de Pareto, pode-se notar que os fatores significantes que estão dentro da linha de referência para o modelo, conforme Figura 16 a seguir.

Figura 17 - Gráfico de Pareto para fração solar média anual.



Fonte: Autor.

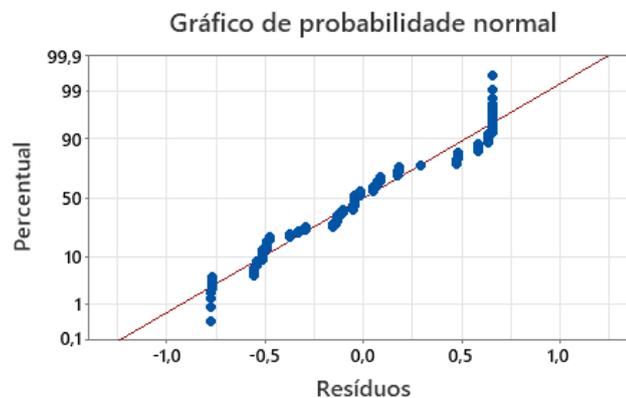
O gráfico indica que o fator mais influente na resposta é o módulo escolhido, seguido pela área do conjunto de módulos, depois pede-se a interação módulo \times área e por fim pela cidade escolhida.

A partir das equações de regressão e também dos resultados da análise de variância e dos coeficientes codificados, foi possível comprovar o gráfico de Pareto. Contudo, percebe-se que ao analisarmos a Tabela 6 dos coeficientes codificados temos o fator cidade ainda sendo importante para o modelo e segundo o intervalo de confiabilidade pode-se concluir que a cidade 3 (Recife) e 4 (Manaus) obtiveram os melhores resultados a partir da aplicação do modelo.

Quanto a análise do R^2 , R^2_{Predito} e R^2_{Ajustado} , o valor obtido antes da de empregado o intervalo de confiabilidade foi de 98,97%, 98,69% e 98,30%. Refinando o modelo, os valores ficaram abaixo do esperado para o resultado desejado. R^2 teve como valor 97,34%, R^2_{Predito} com 97,06% e o R^2_{Ajustado} 97,21%. Isso significa, que o modelo diminui o ajuste de dados quando o intervalo de confiabilidade é aplicado.

Analisando agora os gráficos dos resíduos para o modelo empregado, na Figura 17 abaixo é apresentado o gráfico de probabilidade normal.

Figura 18 - Gráfico de probabilidade normal para a fração solar média anual.

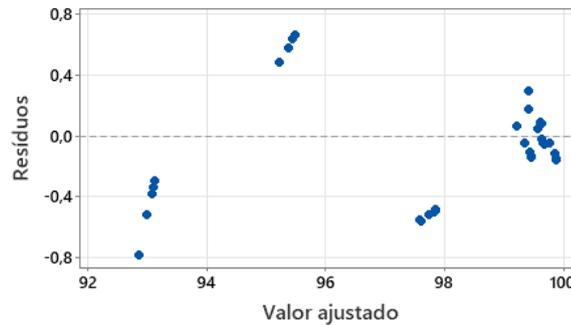


Fonte: Autor.

A partir da linha de tendência de cor vermelha apresentada no gráfico, pode-se notar que os resultados descritos pelos pontos azuis que o modelo segue um padrão de resposta. Outra conclusão que pode ser obtida interpretando o gráfico é que os resíduos estão distribuídos normalmente.

A seguir é apresentado o gráfico de resíduos \times valor ajustado para o modelo estudado.

Figura 19 - Gráfico de resíduos x valores ajustados.
Versus Ajustados

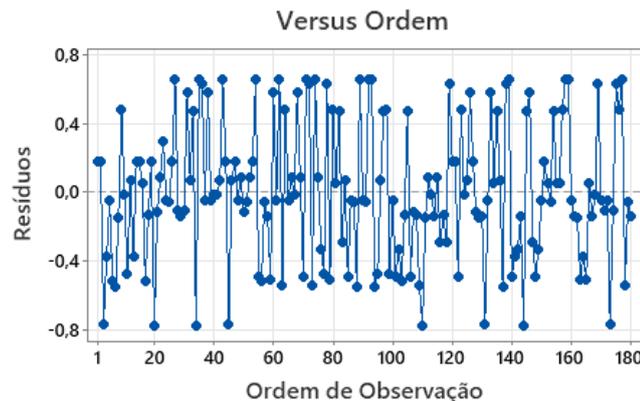


Fonte: Autor.

Interpretando o gráfico acima, pode-se dizer que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente e que possuem variância constante pelo fato de os pontos estarem distribuídos em torno de zero. Apesar de termos alguns pontos próximos da linha central, isso não prejudica o modelo.

A seguir, é apresentada a relação de resíduos x ordem de observação.

Figura 20 - Gráfico de resíduos x ordem.



Fonte: Autor.

O gráfico apresenta os resíduos distribuídos aleatoriamente em torno da linha central ao longo da linha temporal dos experimentos. Assim, pode-se concluir que os resíduos são independentes uns dos outros.

6 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido, teve como intuito a análise da geração de energia para um frigorífico padrão a partir de painéis solares térmicos aplicados no *software* TRNSYS. Com o auxílio do *software* estatístico MINITAB, foi possível determinar o número de experimentos a serem realizados tanto para análise de geração de energia média anual quanto para a da fração solar. Ao total foram realizados 360 experimentos, nos quais foram alterados os valores dos parâmetros escolhidos, de forma a atender o tipo de análise escolhida que foi a de *Box-Behnken*.

A partir dos resultados para a análise de geração de energia média anual, notou-se que os resultados para o modelo garantiram a sua validação. Com os resultados da análise de R^2 , $R^2_{Ajustado}$ e $R^2_{Predito}$, foi possível verificar que o modelo está bem ajustado e, também, que é possível prever termos que possam ser retirados na análise e que ajustando o modelo a partir da aplicação do intervalo de

confiabilidade foi possível tornar o modelo mais objetivo. Quanto à análise de resíduos, foi possível verificar uma alternância provocada na análise devido ao tipo de módulo a ser escolhido. Ainda, foi possível observar que esse parâmetro é o que mais influencia na geração de energia, conforme mostram os gráficos de Pareto e gráficos de geração de energia para os dois tipos de módulos. Através dos demais gráficos de resíduos, notou-se que o modelo possui seus resíduos distribuídos de forma aleatória e que são independentes uns dos outros.

Quanto a análise da fração solar média anual, após aplicado o intervalo de confiabilidade e verificado os R^2 , R^2_{Ajustado} e R^2_{Predito} , notou-se a diminuição dos valores destes termos para o modelo aplicado. A partir dos gráficos de resíduos notou-se que o modelo segue um padrão de resposta significativo e que os resíduos estão aleatoriamente distribuídos e são independentes uns dos outros. Através do gráfico de Pareto foi possível concluir que o fator tipo de módulo é o mais importante para o modelo estudado.

Com relação às equações de regressão, foi possível verificar que ambas as análises tiveram como fatores importantes o tipo de módulo a ser empregado e também a área de conjunto de módulos. Isso acontece pelas relações com relação a irradiação e os resultados que foram analisados. No caso da análise de fração solar média anual, verificou-se uma dependência nas equações de regressão quanto ao fator cidade e se percebe que o fator não está propriamente inserido nas equações, mas sim como forma de escolha de qual equação escolher.

Por fim, tem-se que o modelo pode ser aplicado tanto para a análise da geração de energia quanto para avaliação da fração solar. Quanto a geração de energia percebe-se que o modelo não depende da cidade onde está sendo implementado, mas sim das características de área e tipo de módulo. Quanto à fração solar a justificativa para a dependência do fator cidade no desempenho do modelo, ocorre devido ao cálculo da fração solar, depender da irradiação incidente que o módulo solar está recebendo e esses valores são distintos para cada cidade do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHTON, Pat. Getting started: Getting started. **Quick Hits for New Faculty: Successful Strategies by Award-Winning Teachers**, [s. l.], p. 4–6, 2004.
- BARRETO, Rafael De Oliveira. AR CONDICIONADO SOLAR – CICLO DE ADSORÇÃO. [s. l.], 2018.
- BORGNAKKE, Van Wylen Sonntag. **Fundamentos da Termodinâmica-Edgard Blucher Ltda.** [S. l.: s. n.], 1998.
- CARVALHO, Enio. RESFRIADORAS DE LÍQUIDOS POR ABSORÇÃO H₂O-LiBr DE SIMPLES E DUPLO EFEITO , INCLUINDO O EFEITO DE ADITIVOS E CLIMA LOCAL. [s. l.], 2007.
- CASCETTA, Furio *et al.* Transient Simulation of a Solar Cooling System for an Agro-Industrial Application. *In:* , 2018. **Energy Procedia**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018. p. 328–335. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.085>
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Publicações**. [S. l.], 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-\(nacional\)](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica/consumo-anual-de-energia-eletrica-por-classe-(nacional)). Acesso em: 9 abr. 2021.
- FROZZA, Janquiel Fernando. Eficiência Energética Em Indústria Frigorífica: Desafios de Implantação. [s. l.], p. 127, 2013.
- HO, Denny. Universidade de são paulo – escola politécnica departamento de engenharia mecânica. [s. l.], 2007.
- KALOGIROU, Soteris A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07038-2>
- KLEIN, S. A. et al. **TRNSYS - Official Website**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html>. Acesso em: 29 abr. 2021.
- MINITAB. **Gráficos de efeitos para Analisar experimento de superfície de resposta - Minitab**. [S. l.], 2019a. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/response-surface/analyze-response-surface-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/effects-plots/>. Acesso em: 2 nov. 2021.
- MINITAB. **Gráficos de resíduos para Ajustar modelo de regressão - Minitab**. [S. l.], 2019b. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/residual-plots/>. Acesso em: 2 nov. 2021.
- MINITAB. **Interpretar todas as estatísticas para Regressão dos melhores subconjuntos -**

Minitab. [S. l.], 2019c. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/best-subsets-regression/interpret-the-results/all-statistics/>. Acesso em: 2 nov. 2021.

MINITAB. Introdução - Minitab. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/getting-started/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

MONTGOMERY, Douglas C. Design and Analysis of Experiments Eighth Edition. [S. l.: s. n.], 2012. ISSN 00401706. Disponível em: <https://doi.org/10.1198/tech.2006.s372>

SOLID. Global perspective on solar heating and cooling | Solarthermalworld. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.solarthermalworld.org/news/global-perspective-solar-heating-and-cooling>. Acesso em: 9 abr. 2021.

SOLID. Singapore: Second Largest Solar Cooling Installation Worldwide | Solarthermalworld. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://www.solarthermalworld.org/installation/singapore-second-largest-solar-cooling-installation-worldwide>. Acesso em: 9 abr. 2021.