

## DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA ENVOLVENDO CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR

Jean Vitor Vassoler dos Santos, jean.vitor-06@outlook.com<sup>1</sup>

Lucas Gomes Reis Costa, lgrc1998@gmail.com<sup>1</sup>

Nicholas Sily Vasconcellos, nicholas.svasc@gmail.com<sup>1</sup>

Arthur Monteiro Filho, arthurmtfilho@gmail.com<sup>1</sup>

Renzo da Silva Ferrarini, renzoferrarini@hotmail.com<sup>1</sup>

Ramon Silva Martins, ramon.martins@uvv.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal do Espírito Santo, Avenida Vitória, 1729, Jucutuquara, Vitória, ES ,

<sup>2</sup>Universidade Vila Velha, Avenida Comissário José Dantas de Melo, 21, Boa Vista II, Vila Velha, ES,

**Resumo.** Este estudo visa a elaboração de uma bancada didática de refrigeração por absorção com utilização da energia solar como principal recurso. A carga térmica no local a ser refrigerado foi determinada segundo a norma ABNT NBR 5858. Os resultados obtidos foram então utilizados na análise, modelagem e determinação dos parâmetros de trabalho do sistema. Obtendo resultados coerentes com aqueles previstos na literatura. O dimensionamento do sistema de aquecimento solar (SAS) foi feito segundo a norma ABNT NBR 15559 obtendo como resultado a área do coletor de 1,45 m<sup>2</sup> e reservatório térmico com 43,5 L. Visando assegurar a viabilidade desta aplicação, foram empregados modelos empíricos de estimativa da radiação solar em Vitória e suas proximidades. Obtendo um modelo com base unicamente em dados meteorológicos de temperatura. Após avaliação por parâmetros estatísticos o modelo provou-se relevante, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) satisfatório de 91,89% assim como um coeficiente de correlação ( $r$ ) de 96,67%, possibilitando assim a determinação do potencial solar em regiões próximas sem a necessidade de medições diretas.

**Palavras chave:** Recurso solar. Sistema de aquecimento solar. Refrigeração. Modelos de estimativa da radiação solar. Energias renováveis

**Abstract.** This study Aims to develop a didactic bench for an Absorption Refrigerator that utilizes solar energy as its primary source. The thermal load on the refrigerated area was determined in accordance to the ABNT NBR 5858 regulation. Results obtained were then utilized in the analysis and modeling of the system as well as in the determination of the work parameters. The Achieved results were in accordance to those provided by the literature. The sizing of the solar heater system was done in accordance to the ABNT NBR 15559 guidelines, obtaining as a result a collector area of 1,45 m<sup>2</sup> and a 43,5 L thermal reservoir. As a means to assure the viability of this application, empirical models for the estimation of solar potential in the city of Vitória and neighboring areas were employed. Obtaining a meteorological based model solely reliant on temperature data. Upon statistical evaluation the model proved to be relevant, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 91,89% as well as satisfactory correlation coefficient of 96,67%, thus allowing for the possibility to determine solar potential on neighboring regions without the need for direct measurement.

**Keywords:** solar resource, solar heating system, refrigeration, solar radiation estimation models, renewable energy

### 1. INTRODUÇÃO

A energia solar, fonte alternativa e renovável, vem sendo explorada de forma ampla ao redor do mundo. O estudo feito pela *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD) comprova que além de sua utilização ter ganhado destaque há algum tempo, nos últimos anos atingiu alta notoriedade em decorrência da elevada demanda elétrica mundial, a qual, segundo a organização, ainda crescerá 62% nos próximos 30 anos, impulsionado pelos veículos elétricos e uso de ar-condicionado. Aliado a isso, sabe-se que tal demanda cresce em conjunto ao aumento populacional, o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea) estima que no próximo censo demográfico brasileiro (2030) a população passe de 190 milhões para 208 milhões de pessoas. Desta forma, se faz necessário o estudo e o incentivo à utilização de diversas fontes de energia no país, incluindo a energia solar.

Segundo Ara (2010) como o Brasil é um país em desenvolvimento, a expectativa é de que o consumo de energia aumente cada vez mais, se aproximando ao consumo de países já desenvolvidos, em decorrência destes fatores, a engenharia solar vem sendo estudada e aprimorada. De acordo com Meyer (2020), os dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) mostram que o país saltou de 4,6 gigawatts (GW) de capacidade de geração de energia elétrica por meio do sol ao final de 2019 para 7,5 GW ao final de 2020, evidenciando o crescente desenvolvimento da energia solar no Brasil. Desta forma, se torna clara a relevância da inclusão desta fonte de energia sustentável na matriz energética do país.

Grande parte das aplicações da energia solar na engenharia requerem um mapeamento dos recursos solares na região, de maneira a possibilitar um planejamento e dimensionamento ideal do projeto em função da incidência de radiação no local. Por esse motivo percebe-se a necessidade do estudo e a estimativa do recurso solar para as cidades brasileiras, principalmente capitais como a cidade de Vitória (ES), possibilitando assim um planejamento e verificação da viabilidade do dimensionamento ideal do projeto.

Dessa forma, surge a possibilidade de aliar um conjunto de necessidades, com a elaboração de um sistema de refrigeração por absorção utilizando a energia solar como fonte de calor. Apesar de pouco conhecida pela sociedade em geral, essa tecnologia já é considerada antiga, apresentando aumentos e diminuições em sua utilização no decorrer dos anos, em decorrência de fatores econômicos e tecnológicos de cada época. Atualmente, o interesse por esse sistema de refrigeração vem novamente aumentando, devido à possibilidade de se utilizar rejeitos térmicos de processos industriais e sistemas de potência como fonte de energia para a refrigeração, e também ao fato de que as plantas de refrigeração por absorção não causam danos a camada de ozônio e apresentam menor impacto no aquecimento global (Martinelli Junior, 2008).

Dados estes fatores, fica visível a importância do estudo e desenvolvimento de pesquisas nessa área, aprimorando, como exemplo, o sistema de aquecimento solar (SAS) com coletores planos, os quais são desenvolvidos com materiais cada vez mais eficientes para a troca térmica. O incentivo à utilização da energia solar é também fundamental para tornar essa tecnologia cada vez mais acessível, aliando a sustentabilidade da utilização de uma energia renovável tão abundante às crescentes necessidades da sociedade de maneira geral.

## 2. OBJETIVOS

Desenvolvimento de estudos para utilização de fontes alternativas de energia em ambiente urbano, consistindo na análise de viabilidade, dimensionamento e montagem de uma bancada de refrigeração por absorção com a utilização de um sistema de aquecimento solar (SAS), dispondo de estimativas matemáticas da radiação solar, calibradas localmente na região de instalação.

- Levantamento de recurso solar para a cidade de Vitória;
- Calibração e validação de modelo empírico de estimativa do potencial solar em Vitória e suas proximidades;
- Analisar e dimensionar bancada de refrigeração por absorção que utiliza energia solar como fonte de calor;
- Montagem da bancada didática de refrigeração por absorção;
- Dimensionar sistema de coletores solares para fornecer água quente para a bancada de refrigeração por absorção;

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Modelo de estimativa da Radiação Solar e Tratamento de Dados

Dentre os modelos de estimativa baseados na temperatura do ar, optou-se pelo modelo proposto por Hargreaves and Samani (1982), dado pela Eq. (1)

$$\frac{H}{H_0} = a\sqrt{\Delta T} \quad (1)$$

Onde  $H$  (MJ/m<sup>2</sup>dia) é a média mensal da radiação global diária em uma superfície plana,  $H_0$  a média mensal da radiação extraterrestre diária (MJ/m<sup>2</sup>dia),  $a$  é um coeficiente a ser determinado em função dos dados meteorológicos locais, e  $\Delta T$ (°C) a média mensal da amplitude térmica diária. Conforme demonstrado por Duffie and Beckman (2013). Os valores da média mensal da radiação extraterrestre diária ( $H_0$ ) podem ser calculados a partir da Eq. (2)

$$H_0 \left( \frac{kJ}{m^2 dia} \right) = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \left[ \cos \phi \cos \delta \sin \omega_n + \frac{\pi}{180} \omega_n \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2)$$

Onde o termo  $n$  se refere ao dia do ano, contado a partir do dia 1° de janeiro,  $I_{sc}$  indica a constante solar universal com valor médio de 1367 (W/m<sup>2</sup>) e  $\phi$  representa a latitude em graus. Os ângulos de declinação solar ( $\delta$ ) e ângulo médio do nascer do sol ( $\omega_n$ ) são dados, respectivamente, pelas equações Eq. (3) e Eq. (4)

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (3)$$

$$\omega_n(^{\circ}) = \arccos(-tg\phi.tg\delta) \quad (4)$$

Apesar de sua relativa simplicidade, apresentando somente um coeficiente a ser determinado, o modelo apresentado se destacou em um estudo comparativo entre diversos modelos de estimativa da radiação solar global, realizado por Besharat *et al.* (2013), apresentando um coeficiente de correlação (r) de 0.9934, superando os demais modelos à base de medições de temperatura do ar.

Foram utilizados como referência dados meteorológicos coletados na estação automática de Vitória no período de 2006 a 2019, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Sendo empregados dados da radiação solar global e das temperaturas máximas e mínimas do ar, ambos coletados de hora em hora na estação. A partir dos valores horários coletados, utilizando o Software Libre Office, foram realizadas médias diárias e mensais, culminando na obtenção dos valores da média mensal da radiação global diária H (MJ/m<sup>2</sup>dia) e média mensal da amplitude térmica diária ΔT (°C). Durante o processo também foi realizado um controle de qualidade dos dados, retirando valores inconsistentes de medições assim como períodos sem registro, de maneira a não influenciar o valor das médias.

Este intervalo de dados foi então dividido em dois subintervalos, o primeiro, de 2006 a 2014, foi utilizado para elaboração e calibração do modelo, e o segundo, de 2015 a 2019, para avaliar e validar o modelo empírico obtido. A precisão e eficácia do modelo é então determinada pela comparação dos resultados calculados para a média mensal da radiação global diária (H) com aqueles medidos pela estação no mesmo período.

### 3.2 Parâmetros de Análise e Calibração

Tanto nas etapas de calibração quanto de avaliação do modelo são introduzidos diversos parâmetros estatísticos que permitirão mensurar a performance do modelo comparando os valores calculados para a média mensal da radiação global diária, indicado pelo termo (H<sub>c</sub>), com aqueles medidos pela estação no mesmo período (H<sub>m</sub>). Foram utilizados os Parâmetros: Coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), Coeficiente de correlação de Pearson (r), Erro absoluto médio (MABE), do inglês, *mean average bias error*, Erro médio (MBE), do inglês, *mean bias error*, Erro quadrático médio (MSE), do inglês, *mean square error* e a Raiz do erro quadrático médio (RMSE), do inglês, *root mean square error*. Expostos nas equações a seguir:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [H_m(i) - H_c(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [H_m(i) - \overline{H_m}]^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [H_m(i) - H_c(i)]^2} \quad (6)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [H_c(i) - H_m(i)] \quad (7)$$

$$MABE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_c(i) - H_m(i)| \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [H_c(i) - \overline{H_c}][H_m(i) - \overline{H_m}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [H_c(i) - \overline{H_c}]^2 \sum_{i=1}^n [H_m(i) - \overline{H_m}]^2}} \quad (9)$$

Também é introduzido o teste estatístico (t), dado pela Eq. (10), para determinação da significância estatística dos dados obtidos.

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)(MBE)^2}{(RMSE)^2 - (MBE)^2}} \quad (10)$$

Segundo Besharat *et al.* (2013) quanto menor o valor de t, melhor será a performance do modelo. Para se calcular a significância estatísticas das estimativas, deve-se determinar, por meio de tabelas estatísticas, o valor crítico de t para o grau de confiabilidade desejada. Nestas condições o modelo será estatisticamente significativo se o valor de t for inferior ao valor crítico.

A determinação do coeficiente a ,referente à Eq. (1), foi feita por meio de iterações buscando minimizar o erro acumulado entre os valores medidos da média mensal da radiação global (H<sub>m</sub>) e aqueles calculados pelo modelo (H<sub>c</sub>). O parâmetro de erro utilizado foi a soma dos quadrados do erro (SSE), do termo inglês *sum of squared errors*, apresentado na Eq. (11). As iterações foram realizadas pelo solver não linear do LibreOffice, assim como pela utilização do software Octave.

$$SSE = \sum_{i=1}^n [H_m(i) - H_c(i)]^2 \quad (11)$$

### 3.3 Sistema de aquecimento solar e ciclo de refrigeração por absorção

O Sistema de aquecimento Solar (SAS) escolhido é composto por: coletor solar tipo placa plana, reservatório térmico, caixa d'água, tubos e acessórios. Possui a função de aquecer o refrigerante no ciclo de absorção proposto. Os coletores solares recebem água do reservatório térmico, aquecendo e devolvendo-a na temperatura desejada para o reservatório térmico. Este reservatório tem por objetivo manter a temperatura desejada de consumo da água oriunda do coletor, geralmente feito de alumínio (Kalogirou (2004); Heliotek (2017)).

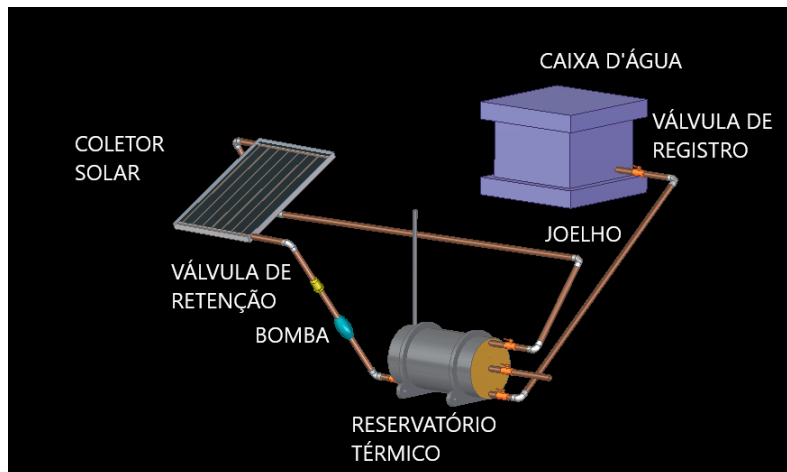


Figura 1. Sistema de aquecimento solar (projetado pelos autores, 2020)

O fluido aquecido proveniente do Sistema de Aquecimento Solar será direcionado para o refrigerador por absorção, fornecendo a carga térmica que alimenta o ciclo. Um sistema de refrigeração por absorção se assemelha ao ciclo mais comumente utilizado, de compressão de vapor. É composto por um condensador, válvula de expansão e evaporador, como pode ser observado na Fig. 2, porém a diferença entre estes ciclos se deve ao conjunto de reações químicas e físicas que ocorrem no absorvedor e no gerador, possibilitando que o sistema de refrigeração por absorção adicione pressão a um líquido, e não a um vapor como acontece no ciclo de compressão (Matos, 2010). Desta forma, como a solução líquida apresenta volume específico muito inferior ao do vapor de refrigerante que seria comprimido no ciclo de compressão, requer uma quantidade significativamente menor de trabalho, consequentemente necessitando de uma potência de acionamento também menor.

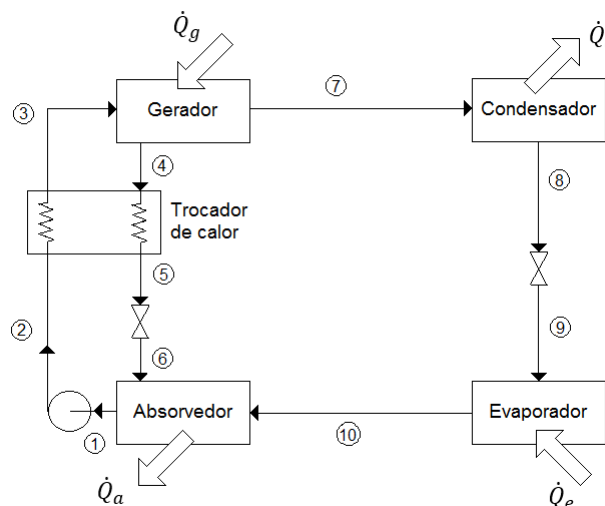


Figura 2. Sistema de aquecimento solar (Pontos de Estudo do Ciclo de Absorção (elaborado pelos autores, 2020)

### 3.4 Análise do sistema de refrigeração por absorção e o dimensionamento do sistema de aquecimento solar

A eficiência e a viabilidade dos ciclos de refrigeração por absorção estão diretamente ligadas às substâncias usadas como par refrigerante/absorvente, isso porque as propriedades químicas, físicas e termodinâmicas interferem diretamente no ciclo. Para o atual trabalho, utiliza-se o par LiBr + H<sub>2</sub>O, por ser viável para a exigência de temperatura requerida, e ser

o mais seguro para o usuário, o que é um fator imprescindível para o condicionamento de ar em uma sala de aula (Labus *et al.*, 2013).

Uma das principais etapas do dimensionamento de equipamentos de climatização é o cálculo da carga térmica, que segundo Matos (2010), é a quantidade de calor colocada ou retirada de um ambiente visando alcançar as condições de conforto desejadas. Esse valor é essencial, pois está diretamente associado a capacidade frigorífica do refrigerador. O cálculo da carga térmica é feito para o laboratório de máquinas térmicas do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), Campus Vitória, com os cálculos baseados no modelo do formulário do anexo A da NBR 5858 (ABNT, 1983), que leva em conta o número de pessoas no ambiente, o tipo de atividade que estão realizando, equipamentos eletrônicos presentes, dimensões da sala, número de janelas, tipos de divisórias, posição geográfica e ainda outros fatores.

Para facilitar os cálculos da carga térmica uma planilha foi criada no software Microsoft Excel 2016, onde foram somadas todas as fontes de calor, assim como indicado na norma ABNT (1983), e o resultado obtido representa a capacidade de refrigeração exigida da bancada.

Os parâmetros iniciais utilizados para o dimensionamento foram baseados nos estabelecidos por Martinelli Junior (2008) em um dimensionamento de refrigeração por absorção para ônibus. A partir disso, a modelagem do sistema de refrigeração por absorção foi feita com a utilização do software EES (*Engineering Equation Solver*), onde foram introduzidos todos os parâmetros iniciais e o equacionamento dos componentes do sistema baseando-se nos aspectos da primeira lei da termodinâmica, e essa formulação foi associada às bibliotecas e rotinas do próprio EES, que já contém as propriedades dos fluidos estudados. Esse equacionamento dos componentes consiste em utilizar as equações de balanço energético para cada equipamento, como apresentado na Eq. (12), na forma genérica apresentada por Yunus A. Çengel (2013), onde  $Q$  = calor transferido,  $W$  = realização de trabalho e  $E_{sistema}$  = variação de energia total do sistema.

$$\Delta Q + \Delta W = \Delta E_{sistema} \quad (12)$$

Isso permite que, a partir dos dados iniciais inseridos, seja possível determinar as temperaturas e as entalpias em todos os pontos do ciclo, além da energia transferida em forma de calor ou trabalho por cada componente. E uma das informações obtidas com esse conjunto de equações é o calor que deve ser transferido no gerador para que o sistema alcance a capacidade de refrigeração determinada. A partir dessa taxa, foi utilizado um método iterativo com o auxílio do EES associado a uma análise de viabilidade comercial, o que levou a seleção da vazão e da temperatura final desejadas no gerador.

Trabalhando com os dados de vazão do sistema de 0,046 m<sup>3</sup>/h e temperatura final desejada de 383,15 K, obtidos do dimensionamento do refrigerador, para que o fluido forneça a carga térmica necessária, o dimensionamento do sistema de aquecimento solar foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 15569, que possuem os seguintes princípios passos: Calcular a energia que tem que ser fornecida ao fluido para atingir a temperatura de consumo desejada e determinar a área do coletor (es) solar (es) que são calculados com as seguintes equações :

$$E_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{arm}} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{\text{arm}} - T_{\text{amb}}) \cdot 30 \text{ dias}}{3600} \quad (13)$$

No qual  $E_{\text{útil}}$  é a energia útil (kWh/mês),  $\rho$  é a massa específica do fluido (kg/m<sup>3</sup>),  $C_p$  é o calor específico do fluido (kJ/kg·K),  $T_{\text{arm}}$  é a temperatura de armazenamento (K),  $T_{\text{amb}}$  é a temperatura ambiente (K) e  $V_{\text{arm}}$  é o volume de armazenamento do sistema (L), mensurada conforme a Eq.14.

$$V_{\text{arm}} = \frac{V_{\text{cons}} \cdot (T_{\text{cons}} - T_{\text{amb}})}{(T_{\text{arm}} - T_{\text{amb}})} \quad (14)$$

$V_{\text{cons}}$  é o volume total do fluido (L) e  $T_{\text{cons}}$  é a temperatura desejada de consumo (K), onde  $T_{\text{arm}} \geq T_{\text{cons}}$ .

$$A_{\text{col}} = \frac{(E_{\text{útil}} + E_{\text{perdas}}) \cdot FC_{\text{cristal}} \cdot 4,89}{PMEE \cdot I_g} \quad (15)$$

$A_{\text{col}}$  é a área do coletor solar (m<sup>2</sup>),  $FC_{\text{cristal}}$  é o fator de correção para a inclinação e orientação do coletor (adimensional),  $PMEE$  é a produção média mensal de energia especificada do coletor solar (kWh/mês.m<sup>2</sup>),  $I_g$  é a radiação global média anual diária do local de instalação (kWh/m<sup>2</sup>) e  $E_{\text{perdas}}$  são as perdas de energia provocado pela transferência de calor (kWh/mês), calculada conforme a norma:

$$E_{\text{perdas}} = E_{\text{útil}} \cdot 0,15 \quad (16)$$

À vista disso, o coletor solar escolhido foi da marca HELIOTEK mt2000 tf 15. Esse coletor tem área 1,5 m<sup>2</sup>. Proporciona produção mensal de energia por coletor de 135,1 [kWh/mês], eficiência energética de 51 e tem classificação no INMETRO A. O reservatório térmico escolhido foi da marca AATUAL-aquecedores solares de 200L.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Modelo de Estimativa da Radiação Solar

Após realizadas as iterações, minimizando o Parâmetro de erro acumulado dado pela Eq. (11), foi obtido o valor de  $a = 0,176$ , finalmente substituindo seu valor na equação Eq. (1) obtém-se um modelo de estimativa da radiação solar calibrado localmente para a cidade de Vitória, exposto na equação Eq. (17)

$$\frac{H}{H_0} = 0,176\sqrt{\Delta T} \quad (17)$$

A Fig. 3 ilustra a comparação entre os valores estimados e medidos da Radiação Solar na cidade de Vitória.

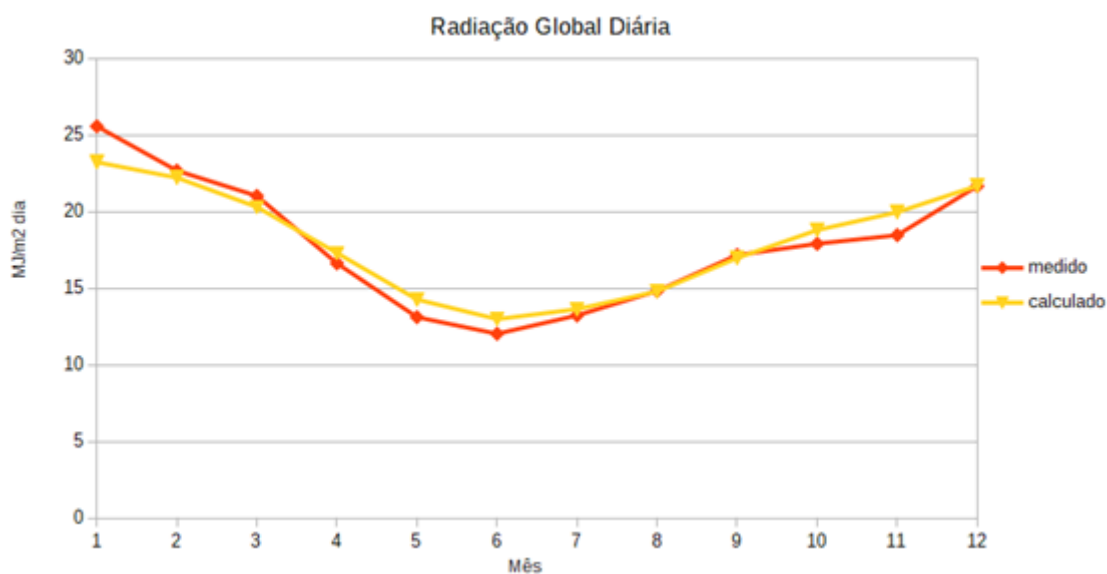


Figura 3. Valores medidos e estimados da média mensal da radiação global diária na cidade Vitória de 2015 a 2019 (Autor,2020)

Os valores obtidos para os parâmetros estatísticos empregados na validação do modelo são expostos na Tab. 1

Tabela 1. Resultados estatísticos da validação do modelo na cidade de vitória no Período de 2015 a 2019 (Autor, 2020)

Parâmetros	R <sup>2</sup>	RMSE (MJ/m <sup>2</sup> dia)	MABE (MJ/m <sup>2</sup> dia)	MBE (MJ/m <sup>2</sup> dia)	r	t
Resultados	0,9189	1,1528	0,9289	0,1927	0,9667	0,5622

Para um modelo com bom desempenho os valores de  $R^2$  e  $r$  devem ser próximos de 1 e os erros absolutos MBE, MABE e RMSE devem ser os menores possíveis. O modelo apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) satisfatório de 91,89% assim como um coeficiente de correlação ( $r$ ) de 96,67%. Busca-se um valor do teste estatístico ( $t$ ) inferior ao valor crítico (2,201 para uma confiabilidade de 95%), portanto os resultados obtidos apresentam significância estatística. Os valores alcançados para os parâmetros foram próximos àqueles, obtidos por Besharat *et al.* (2013) para o mesmo modelo aplicado em outro local com diferentes condições climáticas.

### 4.2 Parâmetros da análise do sistema de refrigeração por absorção e do Sistema de aquecimento solar

Com base na metodologia proposta na norma ABNT NBR 5858:1983 e com o auxílio do Excel, o cálculo da carga térmica do laboratório de máquinas térmicas levou a um valor de 2,72 kW ou 9261,62 Btu/h, que representa também o valor da capacidade térmica do evaporador. Com base nesses valores, através da modelagem do ciclo no EES, foi possível determinar uma taxa de transferência de calor de 3,91 kW exigida no gerador, para que a bancada apresentasse o funcionamento esperado. A partir disso, através do método iterativo, também utilizado o EES, foi determinado que a temperatura e vazão necessárias na água fornecida pelo SAS seriam de 110 °C e 0,046 m<sup>3</sup>/h, respectivamente.

Já o fluxo energético nos componentes do sistema é dado na Tab. 2.

Tabela 2. Fluxo energético nos componentes (elaborado pelos autores, 2020).

Descrição	Símbolo	Valor
Capacidade térmica do evaporador	$\dot{Q}_e$	2,72 kW
Potência mínima de entrada na bomba	$\dot{W}$	$6,19 \times 10^{-5}$ kW
Calor de saída absorvedor	$\dot{Q}_a$	3,74 kW
Calor de entrada do gerador	$\dot{Q}_g$	3,91 kW
Calor de saída do condensador	$\dot{Q}_c$	2,89 kW
Coefficiente de performance	COP	0,69

Em sua tese de doutorado, Martinelli Junior (2008) faz a análise, modelagem e dimensionamento de um sistema de ar condicionado veicular que utiliza o sistema de absorção com utilização da mistura de brometo de lítio e água (LiBr + H<sub>2</sub>O), e os resultados são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3. Fluxos energéticos encontrados por Martinelli Júnior (Martinelli Junior, 2008).

Descrição	Símbolo	Valor
Capacidade térmica do evaporador	$\dot{Q}_e$	18,7 kW
Potência mínima de entrada na bomba	$\dot{W}$	$4,7 \times 10^{-4}$ kW
Calor de saída absorvedor	$\dot{Q}_a$	24,2 kW
Calor de entrada do gerador	$\dot{Q}_g$	26,9 kW
Calor de saída do condensador	$\dot{Q}_c$	20 kW
Coefficiente de performance	COP	0,69

Na tese mencionada, o valor da carga térmica exigido é de 18,7 kW o qual difere dos 2,72 kW exigidos neste projeto. Apesar disso percebeu-se relativa coerência nos resultados encontrados considerando-se as diferentes proporções.

O projeto do sistema de aquecimento solar foi direcionado pela norma ABNT NBR 15569 e os cálculos matemáticos foram realizados com a contribuição do Excel, puderam-se encontrar os resultados que estão na Tab.4. Os parâmetros necessários para dimensionar o SAS são: o volume de consumo que é a vazão necessária para troca térmica no sistema de refrigeração, volume do sistema de armazenamento que está em função do volume de consumo, energia útil e a área do coletor.

A representação do projeto do sistema de aquecimento solar foi feita pelo software CAD Edge (Fig.1) seguindo os manuais técnicos da área de pesquisa e a norma ABNT NBR 15569. Como a área do coletor foi de 1,45 m<sup>2</sup> optou-se pela escolha do coletor mt2000 da empresa Heliotek por ter a área próxima ao que foi calculado e classificação A pelo INMETRO, o volume do reservatório foi de 43,25 L optou-se pela escolha do reservatório de 200L da empresa Aatual. Tais dimensões desses equipamentos encontram-se nos seus respectivos manuais técnicos disponibilizados pelas empresas. A circulação do fluido é forçada, ou seja, necessita-se de uma bomba para que o fluido de trabalho circule no sistema. A altura manométrica total do sistema é a altura entre o ponto máximo do coletor ao ponto mínimo do reservatório que deu uma altura de 2,53 m.c.a. e a vazão do sistema foi de 0,046 m<sup>3</sup>/h, assim com esses dados escolheu a bomba circuladora Schneider Solaris 100.

Para quesito de verificação ao dimensionamento do sistema de aquecimento solar para um sistema de refrigeração por absorção proposto, os resultados encontrados em outros trabalhos estão proporcionais aos encontrado neste projeto. Por exemplo, Shirazi *et al.* (2016) estudou a parametrização de vários tipos de coletores (evacuados, parabólicos, placa plana) para um sistema de aquecimento solar e utilizou área dos coletores de 2,83 m<sup>2</sup>. Asadi *et al.* (2018) fez um estudo sobre os coletores para sistema de refrigeração por absorção é encontrou uma área para o coletor de 24m<sup>2</sup>, devido a capacidade sistema de refrigeração de absorção ser de 10 kW, Buonomano *et al.* (2016) fez uma análise de um sistema de refrigeração acoplado ao sistema de energia solar e encontrou uma área de 52,2 m<sup>2</sup>, para uma capacidade de 23 kW, em comparação ao nosso estudo encontram os uma área 1,45 m<sup>2</sup> para uma capacidade de refrigeração 2,7 kW, a analogia imposta não é

Tabela 4. Resultados dos parâmetros para o dimensionamento do SAS, pelo Excel (elaborada pelos autores, 2020).

PARÂMETROS	MAGNITUDES	UNIDADES
Vol de consumo	45,8	L
Vol do reservatório ( $V_{arm}$ )	43,25	L
Energia útil	134,998	kWh/mês
Área do coletor	1,45	m <sup>2</sup>

exatamente linear devido às características geométricas da instalação do SAS e a radiação solar no local de estudo .

A caracterização, modelagem e análise de uma tecnologia com grande potencial foram feitas no escopo deste trabalho, abrindo assim portas para novos projetos e estudos, que levem a maiores detalhamentos ou até melhorias no sistema aqui descrito, ou ainda, análises de sistema de refrigeração por absorção de maior capacidade ou dimensionamento outros tipos de SAS, como por exemplo, coletor com tubos evacuadas. Para assim apresentar para a sociedade conclusões precisas sobre a utilização dessas tecnologias que incentivem o uso de energias renováveis e buscando de forma geral a diminuição dos impactos econômicos, sociais e ambientais gerados pelo mal gerenciamento dos recursos energéticos disponíveis.

### 4.3 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pelo modelo são satisfatórios, apresentando pequenos erros, tornando-o válido a ser empregado em regiões próximas a cidade de Vitória, sendo necessário apenas dados de temperaturas locais. Conforme sugerido por Almorox *et al.* (2011) modelos que utilizam a temperatura são convenientes para estimativas da radiação solar em uma dada região desde de que os parâmetros possam ser calibrados localmente. Com base no que foi apresentado, o dimensionamento correspondeu proporcionalmente à literatura analisada e o desempenho do coletor está intrinsecamente ligado a fonte de energia, o sol, logo, em dias ensolarados espera-se que seu desempenho seja satisfatório.

Observa-se que os resultados obtidos a partir da modelagem e análise do sistema de refrigeração por absorção estão de acordo com os textos científicos estudados (de Júnior, 2008) e traduzem de forma satisfatória os conceitos termodinâmicos e equacionamentos desenvolvidos no decorrer do projeto, garantindo assim a viabilidade teórica de sua aplicação em uma bancada didática de pequena escala, e garantindo também um funcionamento previsível, desde que seja fornecida a energia de 3,91 kW necessária ao gerador, obtendo-se assim a carga térmica desejada de 2,72 kW.

Para fornecimento de energia necessária ao sistema de refrigeração de capacidade frigorífica de 2,7 kW, uma área mínima necessária de 1,45 m<sup>2</sup> será suficiente. Assim nos aspectos comerciais optou-se por 1 coletor com área de 1,5 m<sup>2</sup>. Desta forma, tendo em vista a coerência dos resultados obtidos para os Sistemas de Aquecimento Solar e de Refrigeração, assim como na validação do modelo de estimativa do solar, conclui-se finalmente que há viabilidade da aplicação da bancada de refrigeração com fins didáticos utilizando o SAS para a captação do recurso energético na região de Vitória.

Com os diversos escopos desenvolvidos no trabalho, pode-se pontuar contribuições para suas respectivas áreas de pesquisa. Os modelos empíricos de estimativa da radiação solar podem ser tomados como referência para futuros trabalhos envolvendo a determinação do potencial solar em locais específicos de cidades capixabas, haja vista que o modelo demonstrou relevância estatística e precisão satisfatória dos resultados. Além disso sua utilização depende somente de valores temperaturas máximas e mínimas diárias, dados estes de fácil medição e maior disponibilidade. O dimensionamento e análise do ciclo de refrigeração por absorção assim como do sistema de aquecimento solar aqui propostos fomentam a realização de futuros estudos de aprofundamento acerca destes tipos de sistemas, assim como comprovam a viabilidade do uso de energias renováveis para sistemas de escala doméstica, visto que a área calculada para o coletor é condizente com uma produção comercial para sistemas de refrigeração

### 5. REFERÊNCIAS

- Aatual, acessado em :16 de Jun.2020. *Reservatório térmico*. Aatual aquecedores solares, Disponível em: <  
<https://aatual.com.br/solucoes/reservatorio-termico/>>.
- ABNT, 1983. *NBR 5858. Condicionador de ar doméstico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT, 2020. *NBR 15569. Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Almorox, J., Hontoria, C. and Benito, M., 2011. “Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in madrid (spain)”. *Applied Energy*, Vol. 88, No. 5, pp. 1703–1709.
- Ara, P.J.S., 2010. *Desempenho de sistemas de condicionamento de ar com utilização de energia solar em edifícios de escritórios*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo.
- Asadi, J., Amani, P., Amani, M., Kasaeian, A. and Bahiraei, M., 2018. “Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of absorption cooling system driven by various solar collectors”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 173, pp. 715–727.
- Besharat, F., Dehghan, A.A. and Faghih, A.R., 2013. “Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 798–821.
- Buonomano, A., Calise, F., d’Accadia, M.D., Ferruzzi, G., Frascogna, S., Palombo, A., Russo, R. and Scarpellino, M., 2016. “Experimental analysis and dynamic simulation of a novel high-temperature solar cooling system”. *Energy conversion and management*, Vol. 109, pp. 19–39.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 2013. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., 1982. “Estimating potential evapotranspiration”. *Journal of the irrigation and Drainage Division*, Vol. 108, No. 3, pp. 225–230.
- Heliotek, 2017. *Manual de instalação e uso Sistema de Aquecimento Solar HIS*. Heliotek, São Paulo.



- Ipea, 2012. *Comunicados do Ipea nº 156 e 157-Tendências demográficas*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília.
- Kalogirou, S.A., 2004. “Solar thermal collectors and applications”. *Progress in energy and combustion science*, Vol. 30, No. 3, pp. 231–295.
- Labus, J.M., Bruno, C.J. and Coronas, A., 2013. “Review on absorption technology with emphasis on small capacity absorption machines”. *Thermal Science*, Vol. 17, No. 3, pp. 739–762.
- Martinelli Junior, L.C., 2008. “Sistema de ar condicionado por absorção para ônibus”.
- Matos, R.S., 2010. *Refrigeração e Climatização*. Universidade Federal Do Paraná, Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC153/Apostila/Apostila%20Refrigera%E7%E3o.pdf>>.
- Meyer R, Sauaia R, K.R., 2020. “A força da energia solar em tempos de pandemia”. *ABSOLAR*, Vol. 1, No. 1, p. s/pag.
- OECD, 2011. *Energy*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Preliminary version.
- Schneider, Acessado em :07 de Ago.2020. *Circuladora solaris*. Schneider motobombas, Disponível em: <<https://aactual.com.br/solucoes/reservatorio-termico/>>.
- Shirazi, A., Taylor, R.A., White, S.D. and Morrison, G.L., 2016. “Transient simulation and parametric study of solar-assisted heating and cooling absorption systems: An energetic, economic and environmental (3e) assessment”. *Renewable Energy*, Vol. 86, pp. 955–971.
- Yunus A. Çengel, M.A.B., 2013. *Termodinâmica*. AMGH, 7th edition.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.