

AVALIAÇÃO DE SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO ALIMENTADO POR ENERGIA TÉRMICA SOLAR NO NORDESTE BRASILEIRO

Taís da Cunha Costa, tais.cunha07@hotmail.com¹

Antonio Gabriel Souza Almeida – gabrielalmeida@ifba.edu.br¹

¹Instituto Federal da Bahia, Rua Emídio dos Santos, s/n, Barbalho, Salvador, Bahia

Resumo: Diante da vasta disponibilidade e baixo impacto ambiental, a utilização de energia solar desponta como um recurso sustentável e promissor. Áreas da região nordeste do Brasil possuem clima semiárido, seco, baixa nebulosidade e incidência solar durante todo o ano, fatores que resultam em condições favoráveis para utilização da energia solar e em condições climáticas que são responsáveis pela alta temperatura e desconforto térmico da população da região. Nesta região, os sistemas de climatização para conforto térmico dos ambientes tornam-se essenciais para o desenvolvimento de atividades laborais e produtivas dos seus ocupantes, gerando um crescente consumo de energia elétrica para operação destes sistemas. Através de simulação computacional, este estudo analisa a viabilidade de um sistema de climatização ativado por fonte térmica advinda da energia solar, com a concepção de um projeto piloto de instalação de um protótipo em uma escola na cidade de Juazeiro, no sertão baiano. O estudo desenvolvido aponta a viabilidade técnica do sistema proposto, porém com algumas limitações para atendimento da carga térmica total durante todo o ano, sendo, portanto, necessário agregar outras tecnologias de modo a imprimir maior confiabilidade ao sistema. Apesar disso, a aplicação mostra-se viável tecnicamente, reduz a emissão de CO₂ para a atmosfera e é passível de aperfeiçoamento tecnológico para domínio da tecnologia e consequente redução de custos de implantação.

Palavras-chave: energia solar; absorção; conforto térmico, ar condicionado; refrigeração solar

1. INTRODUÇÃO

Relatório emitido pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2018) indica que a estabilidade econômica e a elevação da renda média das famílias criaram condições para suprir parte de uma demanda reprimida por conforto ambiental, expresso pelo aumento do consumo de eletricidade devido ao uso de aparelhos de ar condicionado no Brasil. Os dados apontam que o consumo de energia elétrica para condicionamento de ar nas residências brasileiras mais que triplicou nos últimos 12 anos, atingindo 18,7 TWh em 2017.

Segundo a Internacional Energy Agency – IEA (2018), a utilização de equipamentos condicionadores de ar para climatização de ambientes é responsável pelo consumo de aproximadamente 20% da energia elétrica total utilizada em edifícios em todo o mundo e apresenta tendências de crescimento devido ao crescimento econômico e demográfico do mundo. Se não for controlada, a demanda de energia para alimentação dos condicionadores de ar será triplicada até 2050, igualando-se à demanda de eletricidade da China em tempos atuais.

Segundo Pereira (2014), o Brasil possui importante potencial para uso de energia solar térmica, com áreas que possuem satisfatórios índices de irradiação direta e difusa, grande parte no oeste da Bahia, que se estende ao sul do Piauí e norte de Minas Gerais, região do cerrado nordestino. Os municípios do sertão nordestino brasileiro apresentam condições favoráveis para aplicações das tecnologias de aproveitamento da energia solar, com: clima semiárido e seco, baixa incidência de nuvens e chuvas escassas, e terrenos planos que favorecem o transporte dos equipamentos e a montagem dos coletores solares. O desenvolvimento destas tecnologias, com instalação em larga escala, pode propiciar o desenvolvimento econômico da região, criando postos de trabalho diretos e indiretos para a construção e manutenção das instalações do campo de geração solar e de climatização.

Regiões no sertão da Bahia, como o município de Juazeiro, apresentam elevadas temperaturas médias, em torno de 38 °C, conforme dados apresentados pelo BDMET-INMET (2014). A alta temperatura apresentada por longos períodos do ano impacta na crescente demanda por climatização dos edifícios nestes locais, principalmente em espaços destinados a atividades laborais e desenvolvimento cognitivo.

Dentro deste contexto, o desenvolvimento desta pesquisa teve como objetivo analisar a viabilidade técnica de um sistema de climatização através de chiller de absorção alimentado por fonte térmica advinda da energia solar. Através de simulações computacionais, desenvolvidas no software Greenius (*Green Energy System Analysis Tool*) avaliou-se o comportamento das tecnologias existentes de resfriamento solar e a suas aplicabilidades na região dentro do estudo de caso, para a climatização de salas de aulas situadas no Instituto Federal da Bahia, campus Juazeiro.

1.1. Sistemas de geração térmica solar

A tecnologia de geração de energia solar térmica através coletores solares é a mais difundida, possui menor investimento inicial e vasta aplicabilidade. Este método aproveita a energia solar através da absorção da radiação direta e difusa. São basicamente distinguidos pela sua capacidade de rastrear o movimento aparente do sol e a temperatura de operação. Os coletores solares mais populares são os estacionários, que não rastreiam o sol, e não concentradores, que utilizam a radiação direta e difusa. Os principais tipos são: Coletor de placa plana ("Flat plate collectors" ou FPC) e o coletor de tubo evacuado ("Evacuated tube collectors" ou ETC). (Kalougirou, 2014)

O coletor solar do tipo placa plana é o mais comum, correspondendo a 23% da geração de energia solar no mundo. Este consiste num absorvedor e um invólucro isolado coberto com placa de vidro. Já os coletores solares do tipo tubos evacuados têm menor perda de calor e melhor eficiência, principalmente quando opera em altas temperaturas. Sua participação de energia solar é de 51%, principalmente por causa da grande quantidade desses coletores instalados na China. Coletores de tubos evacuados são feitos tipicamente de absorvedores metálicos inseridos em tubos de vidro evacuados, para suportar a diferença de pressão entre o vácuo e a atmosfera. (Ferreira e Kim, 2013)

Enquanto o FPC opera com temperatura entre 30° e 100° C, os coletores solares com tubo evacuado possuem isolamento térmico na parte inferior e na lateral da placa de absorção para reduzir as perdas por condução térmica, logo este tipo de coletor normalmente opera na faixa de temperatura entre 50° a 200° C, o que é importante muitas vezes em projetos de aquecimento para processos industriais, ou para sistemas de ar condicionado solar por resfriadores a absorção.. (Kalougirou, 2014)

Em estudo apresentado por Ferreira e Kim (2013), os coletores de tubos evacuados produzem diariamente mais calor que coletores de placa plana. No entanto, quando em aplicações onde a diferença entre a temperatura externa e a temperatura requerida do fluido térmico seja de apenas 25%, o rendimento dos coletores de placas planas aproxima-se do rendimento dos coletores de tubo evacuado, podendo assim não justificar o investimento. Quando em alta diferença de temperatura, aproximadamente 60%, os coletores de tubo evacuado apresentam grande vantagem no rendimento. Como os coletores de placas planas custam aproximadamente 50% dos coletores de tubos evacuados, deve-se verificar a temperatura requerida do fluido térmico para atender o sistema, se altas temperaturas, próximas a 100 °C, o coletor tubo evacuado pode apresentar uma boa relação custo benefício.

Rosa (2012) explica que os tubos são de vidro, compostos por dois tubos concêntricos onde no tubo interno está o fluido de trabalho e o mesmo está coberto na parte externa com uma camada seletiva. Entre o interno e o externo está o isolamento a vácuo que é o principal responsável por atenuar as perdas térmicas por convecção e condução. Devido a isso, o fluido (água) não absorve a temperatura externa, protegendo o sistema em climas frios e com neve, evitando a necessidade de utilização de sistemas anticongelamento como válvulas mecânicas, elétricas ou sistemas de circulação de água nos coletores, métodos que podem gerar perda de água ou energia.

Segundo estudo realizado por Ara (2010), a adoção de coletores de tubo a vácuo (ETC), é mais eficiente, pois estes coletores são capazes de aquecer a água a temperaturas maiores que os coletores planos (FPC), possibilitando a adoção de chiller mais eficiente de duplo efeito, que possuem maior COP (coeficiente de performance). Neste estudo, sistemas com coletores tipo ETC foram associados a um chiller de absorção para climatização de um edifício de escritórios na capital de São Paulo. Ara (2010) demonstrou que ao utilizar coletores ETC, o sistema auxiliar, que consome energia elétrica quando a energia solar não é suficiente para atender o chiller, foi menos acionado, resultando numa melhora significativa da eficiência do sistema e menor consumo de energia elétrica.

Portanto, tendo como premissas o estado da arte de aplicação dos tipos de coletores solares, para o desenvolvimento deste estudo de caso, optou-se pela utilização de coletores solares do tipo tubo evacuado, pois estes operam em temperatura suficiente para acionamento do chiller pré-selecionado. O local do estudo de caso apresenta altas temperaturas ambientes, com dias ensolarados em sua maioria. Além disso, o edifício analisado possui somente pavimento térreo, com grandes áreas disponíveis para instalação de coletores solares.

1.2. Sistema de ar condicionado solar térmico

Nos sistemas de climatização solar térmico, o chiller de absorção produz o efeito de refrigeração através de reações termoquímicas entre um par de fluido refrigerante e uma fonte de calor, neste caso advinda da geração de energia solar térmica. (Balgouti et al., 2007).

Conforme apresentado por Ferreira e Kim (2013), tendo em vista que a demanda por refrigeração cresce com a intensidade da radiação solar, a refrigeração através de fonte de energia solar pode ser considerada uma solução lógica. Este tipo de aplicação implica no consumo de energia primária na fonte original, isto é, antes das transformações que levaram ao uso final do recurso energético.

Segundo Sarbu et al. (2013) os sistemas de absorção solar utilizam a energia térmica advinda de um sistema de coletores solares para ativar a reação do chiller de absorção, dissociando a mistura refrigerante / absorvente.

Segundo Belizário (2018), que avaliou energeticamente e financeiramente a utilização de sistemas de condicionamento de ar acionado por energia solar em ambientes de missão crítica para diferentes regiões climáticas, verificou-se a confiabilidade deste tipo de sistema. Através de chiller de absorção e coletores solares tipo tubo evacuado, concluiu-se que o resfriamento solar pode atingir até 50% de economia na conta de energia e quando associada a um sistema de resfriamento natural (ventilação) a economia pode atingir até 68%.

Leitão (2014) apresentou estudo de caso de análise energética de sistema de condicionamento de ar com utilização de energia solar para atender as salas de aula do edifício da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Após simulações através do Energy Plus, constatou-se que a aplicação do sistema é viável tecnicamente, porém inviável economicamente, pois durante vários períodos do ano há o acionamento do sistema auxiliar para aquecimento do fluido de transferência. Além disso, para o sistema de geração solar atender todo o edifício, seria necessária uma área quase seis vezes maior que a disponível na cobertura do prédio para a instalação dos coletores solares evacuados. Esta conclusão corrobora o estudo apresentado por Ara (2010), no qual construções verticalizadas não apresentam vantagens para aplicação deste tipo de sistema.

Santos et. al. (2018) apresentou estudo comparando a viabilidade econômica do sistema de energia solar fotovoltaico com o sistema de chiller de absorção associado a coletores térmicos, em edificação com escritórios de diferentes portes, localizados em Belo Horizonte. Concluiu-se que, para o porte de sistemas de ar condicionado estudados, o sistema solar fotovoltaico é economicamente viável em aplicações com capacidades de 25 TR a 121 TR, sendo recomendado o uso do chiller por compressão com geração fotovoltaica. Para cargas térmicas superiores a 121 TR, o ciclo de absorção com coletores térmicos solar mostrou-se mais econômico. Ao que tange a análise econômica realizada para o sistema fotovoltaico, a tecnologia se mostra economicamente viável com tempo de retorno de investimento entre 36 a 47 meses.

Já Balghouthi e Guizani (2007), avaliaram a viabilidade técnica do resfriamento com chiller de absorção movido a energia solar sob condições meteorológica da Tunísia. O sistema foi modelado usando os programas TRNSYS e EES. O sistema foi otimizado para um edifício típico de 150 m², composto por: resfriador de absorção de brometo de lítio água com capacidade de 11 kW, 30 m² de área de coletor solar com placa plana inclinada e um tanque de armazenamento de água quente de 0,8 m³. Os resultados da simulação mostraram que, apesar de seu alto custo inicial, a aplicação do sistema é viável tecnicamente nas condições climáticas locais e esses sistemas podem ajudar a minimizar o uso de energia baseada em combustíveis fósseis.

Em Pequim, na China, foi construído um edifício com o conceito “Zero-Energy”, no qual o objetivo foi obter o menor consumo de energia e adotar fontes renováveis, incorporando um sistema de aquecimento e resfriamento solar. O sistema incluiu um resfriador de líquido de absorção com capacidade de 35,17 kW (10 TR), coletores solares de tubos evacuados ocupando área de 320,6 m², dois tanques de armazenamento de fluido térmico (com capacidades de 10 m³ e 30 m³, respectivamente), dois tanques de armazenamento de água fria (ambos com uma capacidade de 10 m³) e uma torre de resfriamento de 281 kW. Para backup foram usados sistemas de bomba de calor. Sun et al. (2017), que analisou as instalações, verificou que a fração de carga de resfriamento atendida pela energia solar foi de 25,2%, perto da meta prevista no projeto, de 30%. Além disso, em dias ensolarados a eficiência diária do coletor solar variou de 0,327 a 0,507 e o coeficiente de desempenho do refrigerador (COP) variou de 0,49 a 0,70, respectivamente. Atualmente o edifício é objetivo de otimização, comissionamento e estudo para otimização e melhoria da eficiência energética dos coletores solares e demais componentes do TES (“thermal energy storage” armazenamento de energia térmica).

Porumb et al. (2015) apresentou uma avaliação do potencial do uso da radiação solar em sistemas de ar condicionado aplicado a um edifício de escritório localizado em Cluj-Napoca, Romênia. O estudo foi realizado pelo período de um ano, com base em valores médios plurianuais para radiação solar e temperatura ambiente. Foram comparados os desempenhos de dois tipos de sistemas de refrigeração solar, um baseado resfriador de absorção utilizando energia térmica e outro sistema com resfriador elétrico alimentado por painéis fotovoltaicos. O estudo provou que na Romênia, particularmente em Cluj-Napoca, a radiação solar apresenta potencial suficiente para atender aos sistemas de ar condicionado em um grande edifício de escritórios. Geralmente, ambos os sistemas de refrigeração solar fornecem apenas uma parte da carga de resfriamento necessária ao edifício, mas, por curtos períodos, ambos os sistemas podem fornecer mais que o necessário. Nesses períodos, o sistema fotovoltaico é mais versátil, pois o excesso de eletricidade pode ser facilmente utilizado pelo edifício, mas o sistema de absorção precisa de capacidades de armazenamento de água arrefecida. Ambas as tecnologias de refrigeração solar foram avaliadas e apresentam dados capazes de satisfazer a necessidade necessária de refrigeração. O sistema de resfriamento por absorção solar pode fornecer uma fração de resfriamento solar anual de 24,5%, enquanto o sistema de resfriamento fotovoltaico pode fornecer uma maior fração de resfriamento solar anual de 36,6%, mas com maior investimento inicial.

Linjawi et al. (2015) apresentou simulações de diferentes arranjos de sistemas de refrigeração solares acionados por energia térmica, a fim de reduzir o pico cargas de refrigeração e aquecimento em edifícios de escritórios na Arábia Saudita. Variando o número de coletores e diferente tempo de operação durante o dia em que é necessária a carga de resfriamento de pico, o desempenho dos coletores de placa plana e coletores de tubos evacuados foram avaliados. Os resultados sugeriram que os coletores de placa plana são mais eficientes para esta aplicação em relação aos coletores de tubos evacuados, quando a diferença de temperatura entre a temperatura externa e a temperatura de saída do fluido térmico do coletor é em torno de 5 ° C, nesta condição o coletor de placa plana mostrou-se mais eficiente e, consequentemente, apresenta melhor relação custo benefício.

2. METODOLOGIA

2.1. Identificação das características ambientais

Nesta etapa foram definidas as características ambientais do local de simulação do sistema e as características internas dos ambientes climatizados. O estudo de caso foi aplicado para o Instituto Federal de Educação, Ciência e

Tecnologia da Bahia (IFBA) campus Juazeiro, que atende a comunidade da região do Vale do São Francisco, no sertão da Bahia. Este local foi definido por tratar-se de uma edificação escolar situada em local de clima semiárido, com baixa nebulosidade, elevadas temperaturas e elevados índices de irradiação solar global (GHI), conforme dados do Departamento de Energia do Estados Unidos (DOE), com GHI de 2.021 kWh/m^2 , Irradiação normal direta (DNI) de 909 kWh/m^2 e Irradiação normal difusa (Diff) de 879 kWh/m^2 .

Para objeto de estudo de caso foi delimitado uma área do edifício que possui apenas andar térreo, com 13 salas de aula e 8 laboratórios. Atualmente estes ambientes não são climatizados e, portanto, são alvo de reclamações constantes dos seus usuários. A climatização destes ambientes demonstra-se importante para o conforto térmico dos ocupantes, possibilitando maior produtividade nas atividades laborais e intelectuais, além de trazer maior segurança na operação de alguns equipamentos e materiais utilizados nos laboratórios de ensino. As condições internas adotadas para os ambientes foram definidas conforme norma ABNT NBR 16401/1-2-3:2008, que define parâmetros e recomendações para concepção de projetos de climatização.

2.2. Cálculo de carga térmica

Para o cálculo da carga térmica dos ambientes foram verificados os aspectos construtivos e as características da construção. Foi adotado o método simplificado de carga térmica de verão conforme referência da norma ABNT NBR 5858/1983. A taxa de renovação de ar foi adotada conforme legislação sobre qualidade do ar interior, Portaria nº 3523/1998 estabelecida pelo Ministério da Saúde. Considerando estas diretrizes, obteve-se a carga térmica estimada total de 280 kW.

2.3. Dimensionamento dos principais componentes do sistema

Com base na análise dos parâmetros e dados levantados, foi definida a arquitetura base do sistema, apresentada na Fig. 1, além do porte da instalação e principais componentes do sistema proposto.

Além de atender a carga térmica efetiva, o chiller foi selecionado para operar com solução de brometo de Lítio e água (LiBr-H₂O), pois são fluidos com menor potencial de agressividade ao meio ambiente e não apresentam risco de intoxicação humana.

Conforme disponibilidade do banco de dados do software de simulação Greenius, foi selecionado o chiller que atendeu, prioritariamente, o tipo de fluido térmico da fonte quente, água, em seguida foi verificada a carga térmica efetiva do equipamento ao ser atendido com água quente na faixa de temperatura do coletor evacuado, por fim, verificou-se o par de fluido refrigerante.

Com base no levantamento realizado para este tipo de aplicação e características climáticas, foram adotados coletores do tipo tubos evacuados. A quantidade de coletores solares foi definida conforme disponibilidade de área do telhado do edifício, visto que, quanto maior a quantidade de coletores solares instalados, maior será a geração térmica e o seu excedente poderá ser acumulado e utilizado nos períodos em que a geração solar apresentar-se insuficiente para atender o sistema. Os parâmetros de temperatura e vazão de água quente requeridas para o acionamento do resfriador de líquido foram verificados no catálogo técnico do equipamento e, com base nestas informações, foram verificados os coletores solares do tipo tubo evacuado disponíveis no software de simulação Greenius.

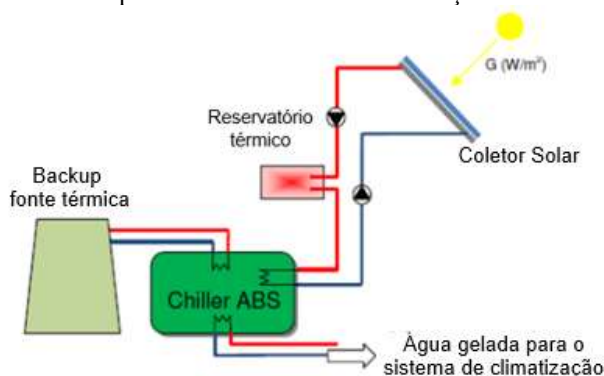


Figura 1: Esquema do sistema de ar condicionado solar térmico (Fonte: Adaptado Ara, 2010)

2.4. Modelagem do sistema

A arquitetura do sistema foi modelada para possibilitar a simulação computacional através do software Greenius (Green Energy System Analysis Tool). Desenvolvido no Instituto de Pesquisa Solar do Centro Aeroespacial Alemão (DLR), o Greenius é uma ferramenta de análise de sistemas de energia, utilizada para cálculos de desempenho de sistema solares, sendo possível simular sistemas de geração de eletricidade de fontes renováveis, sistemas de concentradores solar (CSP) e geração de calor solar para processo e resfriamento. O software dispõe de banco de dados técnicos para a simulação do comportamento do sistema em operação. Buscou-se explorar o banco de dados disponível, selecionando os

componentes que o software dispõe e variando os parâmetros editáveis de modo a aproximar-se das condições de operação real do sistema proposto.

Para a modelagem do sistema, além dos dados geográficos, foram inseridos no software os dados meteorológicos anuais do local de simulação, disponíveis no site do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). Porém, o site não dispõe de dados para o município de Juazeiro/BA, sendo assim o estudo de caso foi desenvolvido utilizando os dados meteorológicos do município de Petrolina/PE, situado à 5 km de Juazeiro/BA. (Nome do arquivo: BRA_PE_Petrolina.819910_INMET.epw)

O delineamento do perfil de carga térmica da edificação é importante para este estudo, visto que, como característica deste tipo de sistema, os períodos de menor incidência solar obtêm-se menor geração térmica, porém são os períodos de menor demanda de carga térmica. Considerando que o perfil de carga térmica do edifício varia conforme as estações climáticas do ano e baseando-se no estudo apresentado por Negreiros (2010), foi adotado o perfil de carga térmica apresentado na Tab. 1, no qual, a partir dos percentuais mensais, obteve-se a carga térmica mensal e estas foram inseridas no software.

Tabela 1: Perfil de carga térmica anual

Mês	Percentual de pico de carga térmica	Carga Térmica mensal (kW)
Janeiro	100%	280,00
Fevereiro	85%	238,00
Março	85%	238,00
Abril	70%	196,00
Maio	70%	196,00
Junho	60%	168,00
Julho	60%	168,00
Agosto	70%	196,00
Setembro	70%	196,00
Outubro	90%	252,00
Novembro	85%	238,00
Dezembro	100%	280,00

O sistema de geração térmica solar é constituído de coletores solares e reservatório térmico. Para a simulação foi necessário definir os parâmetros relativos aos coletores solares para inserção no software, foram estes: tipo de coletor, quantidade, temperatura de água quente requerida pelo resfriador de líquido, ângulo azimute e ângulo de inclinação. Dentre os coletores de tubo evacuado disponíveis no software, foi selecionado o que possui maior eficiência térmica. Nome do arquivo selecionado: VTC WIKORA WIKOSUN DF 65 - 30.gpa. Para maior eficiência na captação solar, foram definidos o ângulo azimute e o ângulo de inclinação do coletor. Conforme orientação do catálogo do fabricante, os coletores devem ser orientados para o norte, logo o ângulo azimute foi parametrizado em 180°. Para a definição da inclinação, foram realizadas simulações variando o ângulo entre 0° e 20°, e foi definido o ângulo que apresentou maior eficiência de captação solar, definido em 15°. A quantidade de coletores solares foi definida conforme área de telhado disponível para alocação do mesmo. Foi considerado 350 coletores solares que ocuparam aproximadamente 1.125 m², equivalente a 90% da área de telhado disponível.

A termoacumulação de água quente advinda dos coletores solares proporciona maior estabilidade no fornecimento de energia térmica ao chiller, além de possibilitar a acumulação para a utilização nos períodos geração térmica insuficiente nos coletores. Para seleção deste componente, foi verificado o reservatório disponível no software que possuía a capacidade de reserva térmica próxima a capacidade térmica do chiller, sendo selecionado o reservatório do tipo simples de 400 kWh. Nome do arquivo: 400 kWh Storage.gpa.

Atendendo aos parâmetros: tipo de fluido térmico da fonte quente, carga térmica efetiva e par de fluido refrigerante, o chiller selecionado foi o modelo YIA 1A1 do fabricante York by Johnson Controls. Nome do arquivo: NC_YIA_1A1.gpa. Os dados técnicos do equipamento foram verificados em catálogo do fabricante. O chiller pode operar com o range de temperatura de 80 a 128 °C na fonte quente, porém a variação desta temperatura reflete na capacidade efetiva do equipamento. Verificou-se que para obter a capacidade efetiva de 280 kW, a temperatura da fonte quente deve ser em torno de 95 °C, conforme definido no catálogo do fabricante.

2.5. Simulações do sistema

Nesta etapa o sistema modelado foi simulado com variações em sua arquitetura base, apresentada na Fig. 1, e modo de operação, buscando verificar o comportamento do sistema sob diversas condições operacionais para obter o melhor aproveitamento solar térmico possível para o sistema proposto. Foi inserido no software o perfil de demanda de carga

térmica, conforme disposto na Tab. 1. Com estes dados, o software deixa de operar no modo “somente energia solar” e passa a considerar outras fontes de energia, elétrica ou combustível fóssil, para realizar o complemento térmico da fonte quente e atender a demanda de carga de refrigeração quando a energia térmica solar não é suficiente. Nesta condição foram realizadas duas simulações: com e sem a inclusão do reservatório de armazenamento térmico, denominadas de simulações 1 e 2, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Simulação 01: Sistema com perfil de demanda sem reservatório térmico

Ao inserir no software o perfil de carga térmica, o sistema deixa de operar no modo “somente energia solar” e passa a considerar fontes térmicas complementares advinda de um sistema auxiliar que pode operar através de resistências elétrica ou queima de combustíveis fósseis. Esta energia térmica gerada pelo sistema auxiliar complementa a energia térmica solar para manter o funcionamento do sistema de climatização e atender o perfil de carga térmica definida. Na simulação 1, foram obtidos energia térmica produzida nos coletores solares foi de 788,94 MWh por ano, o resfriamento produzido pelo chiller foi de 1.196,93 MWh por ano, a quantidade de CO₂ poupado para a atmosfera foi de 236,00 ton e parcela anual do sistema atendido pela energia solar de 33,9%, sendo acionadas fontes complementares de energia. Há uma considerável quantidade de emissão de CO₂ poupadas à atmosfera. O comportamento anual do sistema é apresentado na Fig. 2, na qual constam os dados de produção térmica solar e a utilização de fontes térmicas complementares.

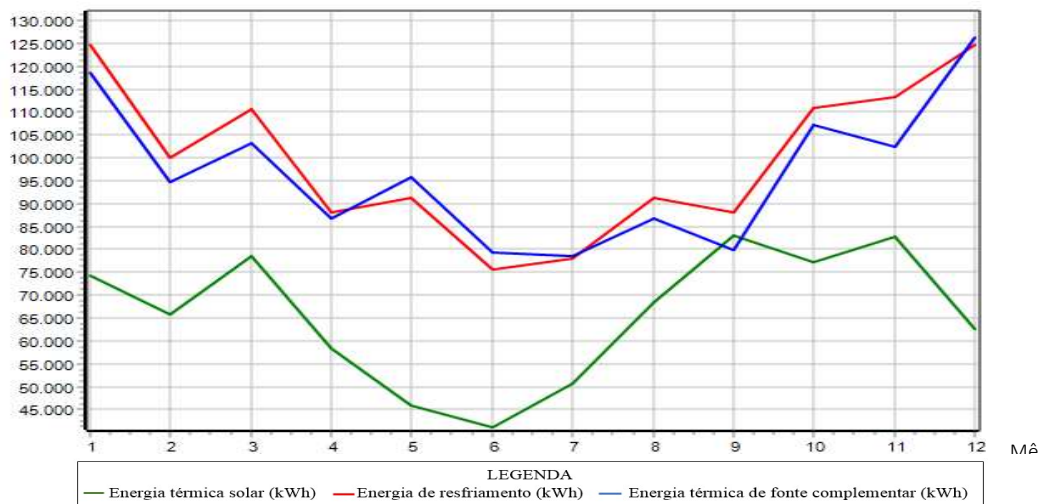


Figura 2: Comportamento anual do sistema operando com demanda sem reservatório térmico

Nos meses de abril a julho, verificamos que a utilização do sistema complementar é maior que a demanda de resfriamento, isto indica que a energia solar neste período é insuficiente para atendimento ao sistema, portanto é necessário acionar o sistema auxiliar por grandes períodos para atender o resfriador de líquido. Analisando o mês de setembro, verificamos que é onde ocorre o menor acionamento do sistema auxiliar, pois a energia solar é suficiente para alimentar o sistema durante boa parte do dia. No mês de junho, apesar de ser o período de menor incidência solar e produção térmica solar, verificamos que não é o período de maior acionamento do sistema auxiliar, pois neste mês também ocorre a menor demanda de carga térmica. De forma contrária, verificamos que nos meses de janeiro e dezembro, apesar da alta taxa de produção térmica solar, há as maiores taxas de acionamento do sistema auxiliar devido a elevada demanda de carga térmica neste período, conforme apresentado na Fig. 3.

No 172º dia do ano (junho) a energia térmica solar gerada pelos coletores não atinge a temperatura adequada para o acionamento do resfriador de líquido, sendo assim, o sistema auxiliar é acionado, produzindo a energia térmica complementar que possibilita o acionamento do chiller e a climatização dos ambientes, conforme disposto no Fig. 4.

Conforme Fig. 5, no 273º dia do ano o sistema solar produz energia térmica suficiente para manter a operação do chiller entre às 9 e 15 horas. O horário de funcionamento do sistema de climatização deverá ser entre às 8 e 22 horas, então o sistema auxiliar é acionamento no início e no final do dia para garantir o funcionamento do sistema de climatização durante o horário pré-estabelecido. É possível verificar que entre às 10 e 14h a geração solar é suficiente para suprir o sistema de ar condicionado.

3.2. Simulação 02: Sistema com perfil de demanda com reservatório térmico

Nesta simulação foi utilizado a configuração da simulação 01 acrescida do reservatório térmico para termoacumulação de água quente excedente gerada pelos coletores solares.

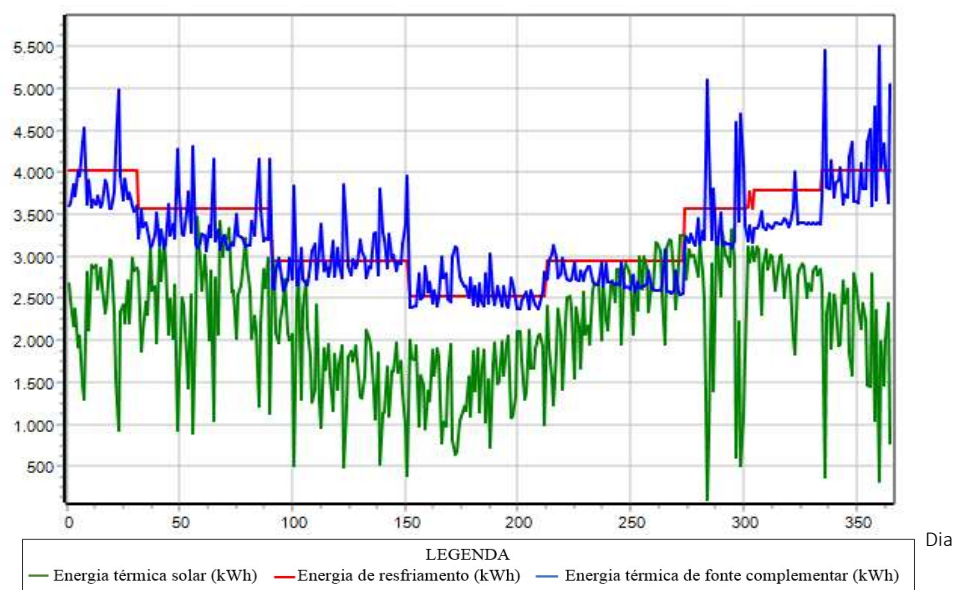


Figura 3: Comportamento anual do sistema com sistema auxiliar térmico e sem termoacumulação

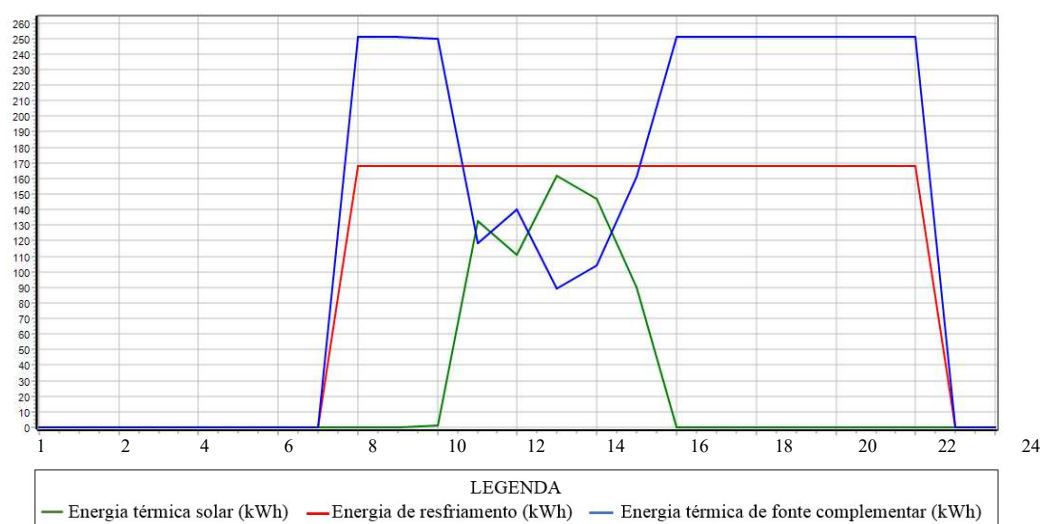


Figura 4: Comportamento do sistema com perfil de demanda e sem reservatório térmico no 172º dia do ano (junho)

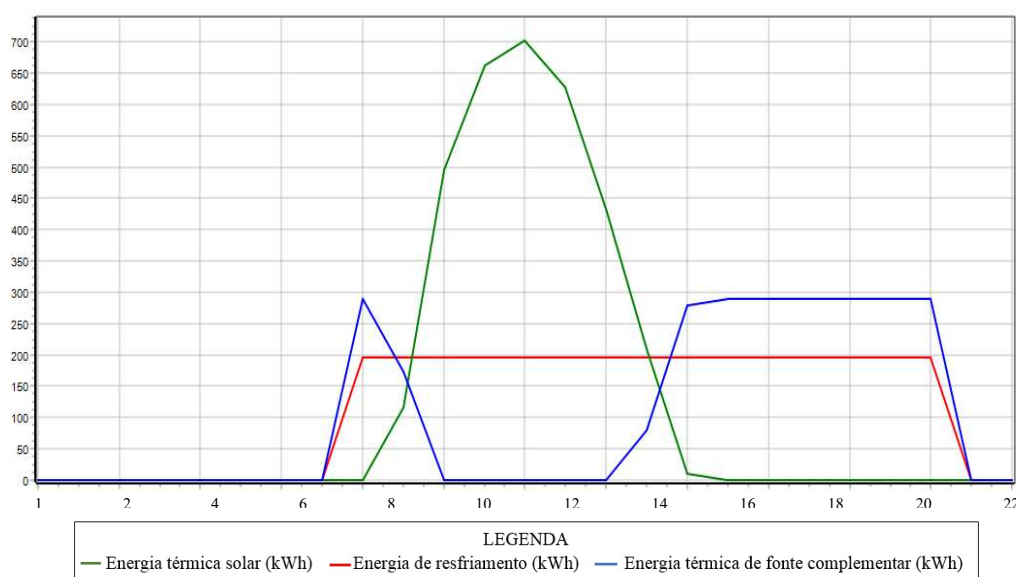


Figura 5: Comportamento do sistema com demanda e sem reservatório térmico no 273º dia do ano (setembro)

Na simulação 2, foram obtidos energia térmica produzida nos coletores solares foi de 788,94 MWh por ano, o resfriamento produzido pelo chiller foi de 1.196,93 MWh por ano, a quantidade de CO2 poupado para a atmosfera foi de 525,8 ton e parcela anual do sistema atendido pela energia solar de 44,8%, sendo acionadas fontes complementares de energia. É possível verificar que nesta simulação não houve acréscimo de energia solar gerada e nem acréscimo na demanda de resfriamento. Porém, devido ao aproveitamento do excedente de energia solar através da termoacumulação, houve um acréscimo no aproveitamento solar térmico, no qual o percentual anual de resfriamento atendido pela energia térmica solar, passa de 33,9 %, apresentado na simulação 1, para 44,8%. Com a inserção da termoacumulação, verifica-se na Fig. 6 o menor acionamento do sistema auxiliar para atendimento da demanda térmica de resfriamento

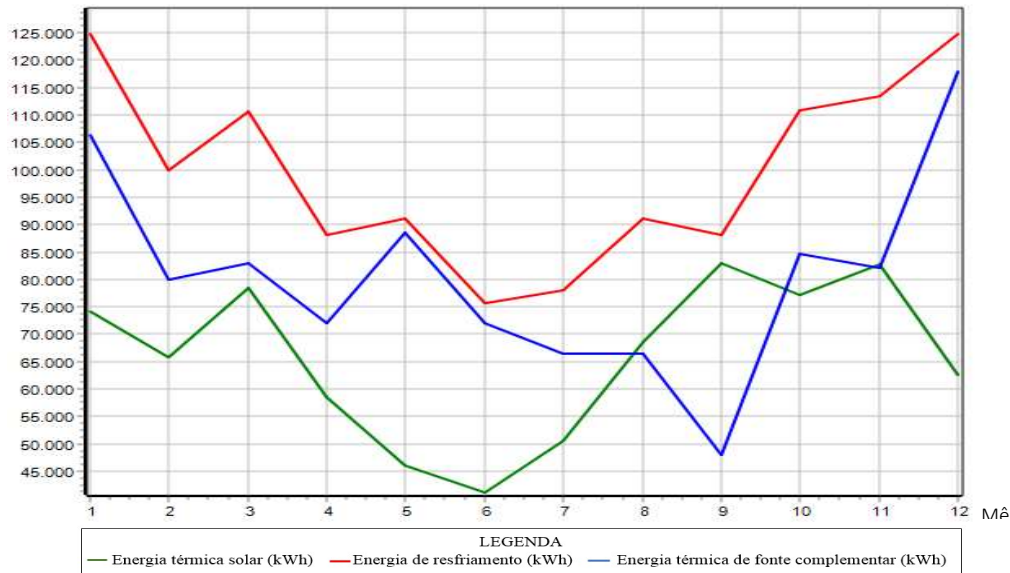


Figura 6: Comportamento anual do sistema operando com demanda e com termoacumulação

No mês de setembro, comparando as simulações sem e com termoacumulação, verifica-se que, com a inserção da termoacumulação, o excedente de energia solar térmica pode ser aproveitado, gerando uma redução de aproximadamente 37,5% da energia térmica advinda de fonte complementar. Houve aumento na taxa de aproveitamento térmico solar e redução do acionamento do sistema auxiliar em todos os meses, porém no período que compreende os meses de setembro a fevereiro, este dado é mais significativo pois são os meses de maior incidência solar, que não estava sendo totalmente aproveitada na simulação 1. A Tab. 2 apresenta a redução da taxa de utilização de energia térmica advinda do sistema auxiliar, quando comparadas as simulações com e sem termoacumulação, simulações 3 e 4 respectivamente.

Tabela 2: Taxa de utilização de energia térmica na simulação 02

Mês	Redução da utilização da fonte térmica auxiliar
Janeiro	10%
Fevereiro	16%
Março	20%
Abril	17%
Maio	7%
Junho	9%
Julho	15%
Agosto	23%
Setembro	40%
Outubro	21%
Novembro	20%
Dezembro	7%

A Fig. 7 apresenta o comportamento do sistema no 273º dia do ano, o qual houve excedente de energia solar térmica passível de termoacumulação. É possível verificar que a demanda de carga térmica do sistema inicia-se as 8h, assim como inicia-se a produção térmica solar, porém como essa ainda não é suficiente para o atender o chiller, ocorre o acionamento

do sistema auxiliar térmico para alimentação do chiller de absorção. Às 10h o sistema de geração solar atinge as condições ideais para suprir o sistema de resfriamento, portanto o sistema auxiliar é desativado, passando a operar no modo “somente energia solar” até as 17h. Durante este período, observa-se que às 9h é iniciado o processo de termoacumulação, o tanque é carregado até as 14h30min e em seguida utilizado no período das 14h30min às 21h. Sendo assim, neste dia o sistema opera no modo “somente energia solar” das 10h às 19h. Às 19h ainda há energia termoacumulada sendo utilizada, porém não em condições ideais, portanto a partir deste horário o sistema auxiliar é acionado complementando a energia térmica solar até as 21h. A partir das 21h, como a termoacumulação já foi totalmente utilizada, o sistema passa a operar atendido totalmente pela energia térmica auxiliar até às 22h. Atendendo assim o horário de funcionamento da escola, de 8h às 22h.

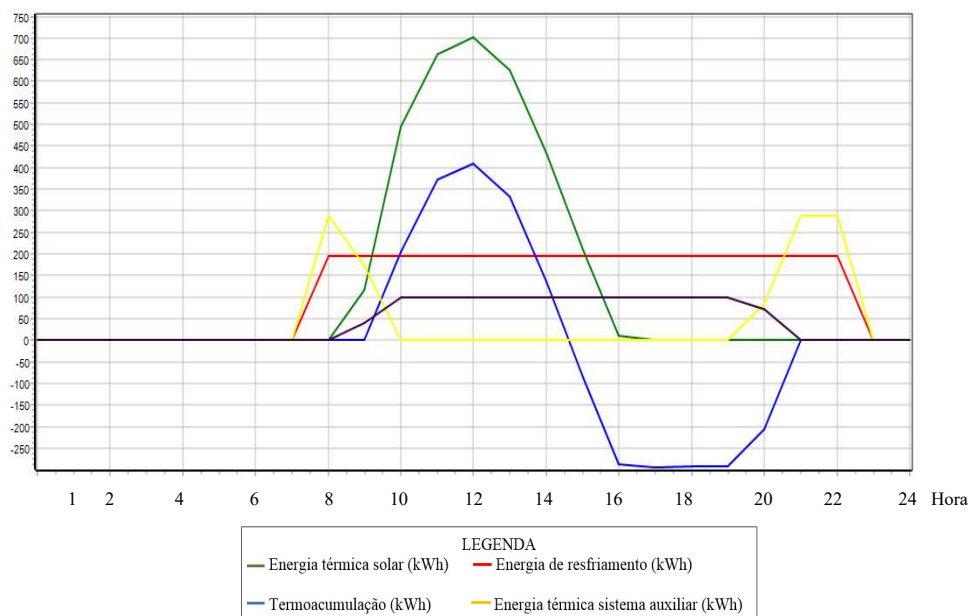


Figura 7: Comportamento do sistema com demanda e com reservatório térmico no 273º dia do ano (setembro)

4. CONCLUSÕES

Com base na análise dos resultados, é possível verificar que o sistema proposto apresenta comportamento satisfatório e demonstra-se tecnicamente viável. Porém, diante da inconstância no fornecimento da energia térmica solar durante o ano, recomenda-se a instalação do sistema de ar condicionado solar atrelado a outras fontes de energia térmica, de modo a suprir o sistema quando energia térmica solar não for suficiente.

O sistema operando no modo “somente energia solar” não apresenta confiabilidade operacional, de modo que haverá dias em que o resfriador líquido não será acionado somente com a fonte térmica solar. Sendo assim, recomenda-se a utilização do sistema proposto atrelado a outro tipo de tecnologia para geração de energia térmica. Como sugestão, apresentam-se aquecedores ou caldeiras que operam com queima de biomassa, utilizando resíduos oriundos de processos agrícolas comuns em regiões sertanejas. A água aquecida por este sistema auxiliar com fonte renovável, poderá ser utilizada como backup para o sistema quando não houver energia solar térmica suficiente.

Visto que, na configuração apresentada na simulação 02, aproximadamente 44,8% da demanda anual por resfriamento para climatização do edifício pode ser atendido por energia solar, esta já representa uma considerável e satisfatória redução de emissão de gás carbônico e dependência das fontes de energia não sustentáveis. As simulações apresentam vantagens na utilização da termoacumulação, pois ficou evidenciado que este componente aumenta o aproveitamento solar pelo sistema de climatização, sendo possível estender o período de operação do chiller em até 5 horas, conforme índice de irradiação solar incidente no dia, e aproximar-se do horário de funcionamento do edifício.

Apesar de não ser viável no modo “solar only”, o sistema mostrou grande potencial de operação, evitando a emissão de aproximadamente 525 toneladas de gás carbônico que seriam gerados para alimentação do sistema, se este fosse alimentado por energia advinda de combustíveis fósseis. A energia térmica solar anual gerada na simulação 04, foi de aproximadamente 789 MWh, suficiente para atender 44,8% da demanda do sistema de climatização, que consumiu aproximadamente 1.196,93 MWh de energia para a produção de água gelada do sistema.

Sendo assim, a configuração do sistema proposto na simulação 02 mostrou-se a aplicação mais adequada para este estudo de caso, sendo possível a implementação deste sistema para atender as salas de aulas e laboratórios do IFBA campus Juazeiro.

5. REFERÊNCIAS

ABNT, 2008, Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários, NBR 16401-1/2/3.

ABNT, 1983, Condicionador de ar doméstico, NBR 5858.

Ara, Paulo Jose Schiavon. Desempenho de sistemas de condicionamento de ar com utilização de energia solar em edifícios de escritórios. 2010. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

Balghouthi, M.; Chahbani, M.h.; Guizani, A.. Feasibility of solar absorption air conditioning in Tunisia. *Building And Environment*, [s.l.], v. 43, n. 9, p.1459-1470, set. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.08.003>.

Belizario, A. C., Avaliação energética e financeira para utilização de sistemas de ar condicionado acionados por energia solar em ambientes de missão crítica para diferentes regiões climáticas. 2018. 237 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

BDMEP - Série histórica - Dados diários - temperatura máxima (°C) - Período entre 31/11/2014 e 31/01/2015 - Juazeiro. Instituto Nacional de Meteorologia. Consultado em 20 de agosto de 2019.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Nota Técnica EPE-DEA-NT-030/2018-r0., 2018.

Ferreira, C. I.; Kim, D.. Techno-economic review of solar cooling technologies based on location-specific data. *International Journal of Refrigeration*, [s.l.], v. 39, p.23-37, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.033>.

Grossman, G.; Johannsen, A., Solar cooling and air conditioning. *Progress in Energy and Combustion Science*. Sci., Vol.7, pp. 185-228

Haverinen-Shaughnessy, U. et al., An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment*, [s.l.], v. 93, p.35-40, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.006>.

IEA [International Energy Agency]. The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning. 2018.

Kalougirou, S., A.. Process and Systems. *Solar Energy Engineering*, [s.l.], p.1-49, 2014. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-397270-5.00001-7>.

Leitão, R. J., Análise energética comparativa entre sistemas de condicionamento de ar com utilização de energia solar: estudo de caso para o edifício do bloco G do centro de tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2014.

Linjawi, M. T.; Talal, Q.; Al-Sulaiman, F. A., Evaluation of solar thermal driven cooling system in office buildings in Saudi Arabia. *E3S Web of Conferences*, [s.l.], v. 23, p.05001-05015, nov. 2017. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20172305001>.

Negreiros, B. de A., Análise de métodos de predição de conforto térmico de habitação em clima quente-úmido com condicionamento passivo. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

Pereira, E. M. D.; Charbel, A.; Aroreir, I.; Mesquita, L. C. de S., Mapeamento básico das condições gerais para tecnologias Heliotérmicas no Brasil. Projeto Energia Heliotérmica. Brasília/DF, 2014.

Plataforma Online de Heliotermia. O sol: fonte de energia. Disponível em: < <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/como-funciona>>. Acesso em: 18 de agosto de 2019.

Porumb, R.; Porumb, B.; Bălan, M., Baseline Evaluation of Potential to Use Solar Radiation in Air Conditioning Applications. *Energy Procedia*, [s.l.], v. 85, p.442-451, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.225>.

Rosa, F. N. da., Aplicabilidade de coletores solares com tubo evacuado no brasil. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Santos, J. de O., Comparação econômica entre o sistema de refrigeração fotovoltaico por compressão de vapor e chillers de absorção com coletores solares térmicos. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 7., 2018, Gramado. Comparação econômica entre o sistema de refrigeração fotovoltaico por compressão de vapor e chillers de absorção com coletores solares térmicos. Gramado: ABENS, 2018. p. 441 - 449.

Sarbu, I.; Sebarcheivici, C., Review of solar refrigeration and cooling systems. *Energy And Buildings*, [s.l.], v. 67, p.286-297, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.022>.

Sheikhani, H., A review of solar absorption cooling systems combined with various auxiliary energy devices. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2018) 134:2197–2212. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7423-4>.

Sun, Z. et al., A Solar Heating and Cooling System in a Nearly Zero-Energy Building: A Case Study in China. *International Journal Of Photoenergy*, [s.l.], v. 2017, p.1-11, 2017. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/2053146>.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho.

EVALUATION OF A SOLAR THERMAL ENERGY HVAC SYSTEM IN THE BRAZILIAN NORTHEAST

Taís da Cunha Costa, tais.cunha07@hotmail.com¹

Antonio Gabriel Souza Almeida – gabrielalmeida@ifba.edu.br¹

¹Federal Institute of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil

Abstract. *Given the wide availability and low environmental impact, the use of solar energy emerges as a sustainable and promising resource. Some areas in the Northeast of Brazil have dry, Semi-arid Climate, low cloud cover and intense sunshine throughout the year, which results in favorable conditions for the utilization of solar energy as well as in high temperature and thermal discomfort over the region's population. In this region, climatization systems for thermal comfort of the environments has become critical for the development of labor and productive activities of their occupants generating an increase in energy consumption for the operation of these systems. Through computational simulation, this study analyzes the feasibility of a climatization system that is thermally activated by solar energy, with the conception of a pilot project to install a prototype in a school in the city of Juazeiro, inner-state Bahia. The study indicates the technical feasibility of the proposed system, with some limitations, however, on meeting the total thermal load throughout the year, therefore, making it necessary to add other technologies in order to increase reliability on the system. Nevertheless, the application is proved to be technically feasible, as well as to reduce CO₂ emissions to the atmosphere and it is subject to technological improvement for mastery of technology and a consequent reduction of implementation costs*

Keywords: solar energy; absorption; thermal comfort; air conditioning; solar refrigeration