

Energia Solar e Eólica

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

 **Atena**
Editora

Ano 2019

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

Energia Solar e Eólica

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Karine de Lima

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E56 Energia solar e eólica [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 1)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-066-7

DOI 10.22533/at.ed.667192201

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. I. Abdala, Paulo Jayme Pereira.

CDD 621.042

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As chamadas energias renováveis, também conhecidas como energias alternativas ou ainda energias limpas são três denominações possíveis para qualquer forma de energia obtida por meio de fontes renováveis, e que não produzem grandes impactos ambientais negativos. Atualmente, com a grande preocupação mundial em compensar as emissões de CO₂, o consumo deste tipo de energia tem sido o foco de governos e empresas em todo globo.

Neste sentido, o Brasil possui uma matriz energética bastante limpa, onde predomina o uso de hidrelétricas, apesar do crescimento do uso de termelétricas, as quais são abastecidas por combustível fóssil. No Brasil, o setor energético é responsável por grande parte das emissões de CO₂, ficando atrás somente do setor agrícola que reapresenta a maior contribuição para o efeito estufa brasileiro.

A energia proveniente do sol é a alternativa renovável mais promissora para o futuro e, por este motivo tem recebido maior atenção e também mais investimentos. A radiação solar gratuita fornecida pelo sol pode ser captada por placas fotovoltaicas e ser posteriormente convertida em energia elétrica. Esses painéis usualmente estão localizados em construções, como indústrias e casas, o que proporciona impactos ambientais mínimos. Esse tipo de energia é uma das mais fáceis de ser implantada em larga escala. Além de beneficiar os consumidores com a redução na conta de energia elétrica reduzem as emissões de CO₂.

Com relação à energia eólica, o Brasil faz parte do grupo dos dez países mais importantes do mundo para investimentos no setor. As emissões de CO₂ requeridas para operar esta fonte de energia alternativa são extremamente baixas e é uma opção atrativa para o país não ser dependente apenas das hidrelétricas. Os investimentos em parques eólicos vem se tornando uma ótima opção para neutralização de carbono emitidos por empresas, indústrias e etc.

Neste contexto, este EBOOK apresenta uma importante contribuição no sentido de atualizar os profissionais que trabalham no setor energético com informações extremamente relevantes. Ele está dividido em dois volumes contendo artigos práticos e teóricos importantes para quem deseja informações sobre o estado da arte acerca do assunto.

Paulo Jayme Pereira Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	10
UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS	
Alexandre José Bühler Ivan Jorge Gabe Fernando Hoefling dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.6671922011	
CAPÍTULO 2	26
VALIDAÇÃO DE MODELOS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	
Bruna de Oliveira Busson Pedro Henrique Fonteles Dias Ivonne Montero Dupont Pedro Hassan Martins Campos Paulo Cesar Marques de Carvalho Edylla Andressa Queiroz Barroso	
DOI 10.22533/at.ed.6671922012	
CAPÍTULO 3	41
A GERAÇÃO SOLAR DE CALOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE GESSO BETA DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE	
André Vitor de Albuquerque Santos Kenia Carvalho Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.6671922013	
CAPÍTULO 4	58
A UTILIZAÇÃO DO SILÍCIO NACIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS SOLARES: UMA REFLEXÃO DAS DIFICULDADES TECNOLÓGICA E FINANCEIRA	
Felipe Souza Davies Gustavo Luiz Frisso Matheus Vinícius Brandão	
DOI 10.22533/at.ed.6671922014	
CAPÍTULO 5	72
AEROPORTO DE VITÓRIA/ES: ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	
Ana Luiza Guimarães Valory Sidney Schaeffer Warley Teixeira Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.6671922015	
CAPÍTULO 6	87
ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO E POLICRISTALINO	
Suellen Caroline Silva Costa Janaína de Oliveira Castro Silva Cristiana Brasil Maia Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz	
DOI 10.22533/at.ed.6671922016	

CAPÍTULO 7	1043
ANÁLISE HARMÔNICA NOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS DE UMA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Alessandro Bogila Joel Rocha Pinto Thales Prini Franchi Thiago Prini Franchi	
DOI 10.22533/at.ed.6671922017	
CAPÍTULO 8	120
ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NO MODELO DE UMA ÁRVORE NA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	
Bárbara de Luca De Franciscis Gouveia	
DOI 10.22533/at.ed.6671922018	
CAPÍTULO 9	139
ANÁLISE FINANCEIRA DE SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA FINANCIADOS EM PALMAS - TO	
Brunno Henrique Brito Maria Lúcia Feitosa Gomes de Melo	
DOI 10.22533/at.ed.6671922019	
CAPÍTULO 10	152
APLICAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESCOLAS MUNICIPAIS DA CIDADE DE CRUZ ALTA/RS: ANÁLISE DE IMPLANTAÇÃO E POTENCIAL DE ENERGIA GERADA	
Alessandra Haas Franciele Rohr Ísis Portolan dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.66719220110	
CAPÍTULO 11	165
APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Augusto Hafemeister João Batista Dias Leonel Augusto Calliari Poltosi	
DOI 10.22533/at.ed.66719220111	
CAPÍTULO 12	181
AR CONDICIONADO SOLAR – CICLO DE ADSORÇÃO	
Rafael de Oliveira Barreto Pollyanne de Oliveira Carvalho Malaquias Matheus de Mendonça Herzog Luciana Carvalho Penha Lucio Cesar de Souza Mesquita Elizabeth Marques Duarte Pereira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220112	
CAPÍTULO 13	194
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO COLETOR SOLAR PLANO ACOPLADO EM SECADOR HÍBRIDO	
Raphaela Soares da Silva Camelo	

Ícaro da Silva Misquita
Thais Andrade de Paula Lovisi
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira
Juliana Lobo Paes
Camila Lucas Guimarães

DOI 10.22533/at.ed.66719220113

CAPÍTULO 14 212

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE NOVO PROTÓTIPO DE FOTOBIORREATOR NÃO TRANSPARENTE PARA CULTIVO DE MICROALGAS COM ILUMINAÇÃO INTERNA ATRAVÉS DE POFS QUE RECEBEM A LUZ DE LENTES MONTADAS EM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

Gisel Chenard Díaz
Yordanka Reyes Cruz
Rene Gonzalez Carliz
Fabio Toshio Dino
Maurílio Novais da Paixão
Donato A. Gomes Aranda
Marina Galindo Chenard

DOI 10.22533/at.ed.66719220114

CAPÍTULO 15 225

AVALIAÇÃO DE WEBSITES BRASILEIROS PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE: PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS

Marina Calcagnotto Mascarello
Letícia Jenisch Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.66719220115

CAPÍTULO 16 241

AVALIAÇÕES DE CUSTO E DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TIPO SIGFI COM DIFERENTES PERÍODOS DE AUTONOMIA

Marta Maria de Almeida Olivieri
Leonardo dos Santos Reis Vieira
Marco Antonio Galdino
Márcia da Rocha Ramos

DOI 10.22533/at.ed.66719220116

CAPÍTULO 17 257

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO CONSIDERANDO O EFEITO DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS ATRAVÉS DO MODELO DO DISCO ATUADOR

Luiz Fernando Pezzi
Adriane Prisco Petry

DOI 10.22533/at.ed.66719220117

CAPÍTULO 18 272

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO - ESTUDO DE CASO EM CURITIBA

Danilo Carvalho de Gouveia
Jeanne Moro
Muza Iwanow
Rebecca Avença
Jair Urbanetz Junior

DOI 10.22533/at.ed.66719220118

CAPÍTULO 19	284
DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SUPERHIDROFÓBICAS COM EFEITO AUTOLIMPANTE PARA APLICAÇÕES EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Lucélio Oliveira Lemos	
Magnum Augusto Moraes Lopes de Jesus	
Aline Geice Vitor Silva	
Angela de Mello Ferreira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220119	
CAPÍTULO 20	297
DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Stéphane Rodrigues da Silva	
Érica Tiemi Anabuki	
Luis Cláudio Gambôa Lopes	
DOI 10.22533/at.ed.66719220120	
CAPÍTULO 21	312
DO PETRÓLEO À ENERGIA FOTOVOLTAICA: A INSERÇÃO DO BRASIL NESTE NOVO MERCADO	
Emilia Ribeiro Gobbo	
Maria Antonia Tavares Fernandes da Silva	
Rosemarie Bröker Bone	
DOI 10.22533/at.ed.66719220121	
CAPÍTULO 22	330
EFEITO DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
José Rafael Cápua Proveti	
Daniel José Custódio Coura	
Carlos Roberto Coutinho	
Adriano Fazolo Nardoto	
DOI 10.22533/at.ed.66719220122	
CAPÍTULO 23	342
ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA E DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO AO COMPLEXO AQUÁTICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA	
Helena Flávia Napolini	
Gustavo Xavier de Andrade Pinto	
Julio Boing Neto	
Ricardo Rütther	
DOI 10.22533/at.ed.66719220123	
CAPÍTULO 24	354
ESTUDO DA SECAGEM INTERMITENTE DA MANGA UTILIZANDO SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Camila Lucas Guimarães	
Juliana Lobo Paes	
Raphaela Soares da Silva Camelo	
Madelon Rodrigues Sá Braz	
Ícaro da Silva Misquita	
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220124	

CAPÍTULO 25	367
ANÁLISE PRÉVIA DO VALOR DA DEPENDÊNCIA DO SOLO PARA AS ATIVIDADES AGRÍCOLAS COM A POSSÍVEL IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO DA SERRA, EM SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS	
Antonio Robson Oliveira da Rosa Leonardo Beroldt Rafael Haag	
DOI 10.22533/at.ed.66719220125	
CAPÍTULO 26	379
APLICAÇÃO DE UM DVR EM AEROGERADORES SCIG E DFIG PARA AUMENTO DE SUORTABILIDADE FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	
Edmar Ferreira Cota Renato Amorim Torres Victor Flores Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.66719220126	
CAPÍTULO 27	398
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA REGIÃO COM TOPOGRAFIA COMPLEXA UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	
William Corrêa Radünz Alexandre Vagtinski de Paula Adriane Prisco Petry	
DOI 10.22533/at.ed.66719220127	
CAPÍTULO 28	410
EDIFICAÇÃO DE ENERGIA POSITIVA: ANÁLISE DE GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR EM CURITIBA	
Larissa Barbosa Krasnhak Elis Almeida Medeiros de Mello Jair Urbanetz Junior Eloy Casagrande Junior	
DOI 10.22533/at.ed.66719220128	
CAPÍTULO 29	422
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA WIFI DE BAIXO CUSTO BASEADO EM THINGSPEAK	
Renan Tavares Figueiredo Odélsia Leonor Sanchez de Alsina Diego Lopes Coriolano Eurípes Lopes de Almeida Neto Ladjane Coelho dos Santos Iraí Tadeu Ferreira de Resende Ana Claudia de Melo Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220129	
SOBRE O ORGANIZADOR	431

AR CONDICIONADO SOLAR – CICLO DE ADSORÇÃO

Rafael de Oliveira Barreto

CEFET MG, Mestrando do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
Belo Horizonte – Minas Gerais

Pollyanne de Oliveira Carvalho Malaquias

UFCG, Mestranda do Departamento de Engenharia Elétrica
Campina Grande – Paraíba

Matheus de Mendonça Herzog

Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG
Belo Horizonte – Minas Gerais

Luciana Carvalho Penha

VERT Arquitetura e Consultoria
Belo Horizonte – Minas Gerais

Lucio Cesar de Souza Mesquita

Instituto Anima Sociesc, Grupo de Estudos e Pesquisa em Energia (GEPEN)
Belo Horizonte – Minas Gerais

Elizabeth Marques Duarte Pereira

Instituto Anima Sociesc, Grupo de Estudos e Pesquisa em Energia (GEPEN)
Belo Horizonte – Minas Gerais

RESUMO: O uso de sistemas de ar condicionado solar vem crescendo em países como Estados Unidos, China e membros da União Europeia. Entretanto, a despeito dos altos níveis de insolação e do aumento do uso de sistemas convencionais no país, tal tecnologia ainda se encontra restrita ao ambiente acadêmico. Este

trabalho apresenta o dimensionamento, projeto, instalação e monitoração de um sistema piloto de ar condicionado solar que utiliza um chiller de adsorção de 10 kW. A carga térmica foi calculada através de simulação computacional no programa EnergyPlus, sendo consideradas as características do ambiente, conforme parâmetros estabelecidos pela ASHRAE. O pré-dimensionamento e avaliação do desempenho de instalações solares para refrigeração e aquecimento de água foram realizados com o programa PISTACHE, desenvolvida por TECSOL e CEA/ INES. Nessa simulação, foram utilizados parâmetros de sete modelos de seis diferentes fabricantes de coletores solares comercializados no país e com mais alto desempenho térmico, para atender aos níveis de temperatura necessários no AC Solar. Os coletores solares instalados são de fabricação nacional com área total de 44 m² e classificação A no Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO. Para monitoração da operação e avaliação do desempenho do sistema foi desenvolvido um supervisor que utiliza o programa LABVIEW, sendo medidos: temperatura (11 pontos); vazão (4 pontos), temperatura e umidade do ar no espaço refrigerado e irradiação solar incidente no plano dos coletores. A aquisição de dados é feita por multímetro de varredura AGILENT 34972A. O coeficiente de desempenho (COP) medido é

da ordem de 0,63. O sistema piloto foi instalado no Laboratório de Monitoração do Grupo de Estudos e Pesquisa em Energia – GEPEN – no Campus Estoril do Centro Universitário Belo Horizonte – UNIBH.

PALAVRAS-CHAVE: Ar condicionado solar, Ciclo de adsorção, Coeficiente de desempenho.

ABSTRACT: The use of solar air conditioning systems has been growing in countries like the United States, China and members of the European Union. However, despite high levels of solar irradiance and increased use of conventional systems in Brazil, such technology is still restricted to the academic environment. This work presents the design installation and monitoring of a solar air conditioning pilot system that uses a 10 kW adsorption chiller. The thermal load was calculated through using energypplus simulation software considering the characteristics of the environment, according to the parameters established by ASHRAE. The pre-sizing and evaluation of the performance of solar installations for water cooling and heating were carried out with the PISTACHE, developed by TEC SOL and CEA / INES. In this simulation, parameters of seven models of six different solar collector manufacturers marketed in the country and with the highest thermal performance were used to meet the temperature levels required in AC Solar. The installed solar collectors are of national manufacture with total area of 44 m² and classification A in the Brazilian Program of Labeling of INMETRO. To monitor the operation and evaluate the performance of the system, a supervisory using the LABVIEW program was developed, measuring: temperature (11 points); (4 points), temperature and humidity of the air in the refrigerated space and solar irradiation incident on the plane of the collectors. Data acquisition is done by AGILENT 34972A scanning multimeter. The measured coefficient of performance (COP) is of the order of 0.63. The pilot system was installed in the Monitoring Laboratory of the Group of Studies and Research in Energy - GEPEN - at the Estoril Campus of the University Center Belo Horizonte - UNIBH.

KEYWORDS: Solar air conditioning, Adsorption cycle, Coefficient of performance.

1 | INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica para acionamento dos condicionadores de ar é fortemente dependente das condições climáticas e da conjuntura econômica. Segundo levantamento da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o consumo de energia elétrica no setor residencial aumentou 3,2% em relação ao ano anterior, com destaque para a região Sul e as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. Este aumento é justificado pelas elevadas temperaturas que ocorreram principalmente no mês de março/2017. Destaca-se que essa correlação entre elevados níveis de irradiação solar incidente, durante o verão, e de temperaturas ambientes aponta para adequação do emprego da tecnologia solar em sistemas de condicionamento de ambiente.

Infelizmente, nas regiões Norte e Centro-Oeste, as famílias consumiram menos energia do que em 2016, ou seja, os consumidores abriram mão do conforto em função da situação econômica.

Para o setor Comercial e de Serviços, outro usuário potencial dos sistemas de condicionamento solar, no primeiro trimestre de 2017, o aumento no consumo de energia elétrica foi de apenas 0,5% em relação à igual período de 2016.

Segundo ELETROBRAS, 2009, 47% do consumo energético comercial é proveniente de sistemas de Ar- condicionado. Dos quais segundo (Alexandre,2016) cerca de 70% do consumo elétrico são devidos aos Chiller's.

Em relação uso de sistemas de condicionamento solar de ambientes, as maiores obras declaradas estão localizadas no Arizona/, EUA e em Singapura (Solid,2017). A obra americana tem capacidade de 3,4 MWth e área coletora de 4.865 m². O ciclo de absorção utiliza de brometo de lítio como fluido absorvente. O sistema entrou em operação em maio de 2014 e sua capacidade de refrigeração por absorção é de 1,75 MW (500 TR).

Em Singapura, o sistema de resfriamento solar de 1,76 MWth foi instalado em agosto 2011 com uma capacidade total de 2,73 MWth e 3.900 m² de área coletora, fornecendo água quente e refrigeração para cerca de 2.900 alunos que vivem e estudam no recém-criado campus.

2 | TECNOLOGIAS AC SOLAR

A energia solar para uso em resfriamento pode ser convertida de duas maneiras principais, conforme apresentado na Fig. 1: eletricidade gerada por painéis fotovoltaicos, que será utilizada posteriormente em equipamentos convencionais que operam em ciclos de compressão de vapor e a refrigeração solar térmica, produzida a partir do aquecimento do fluido de trabalho em coletores solares.

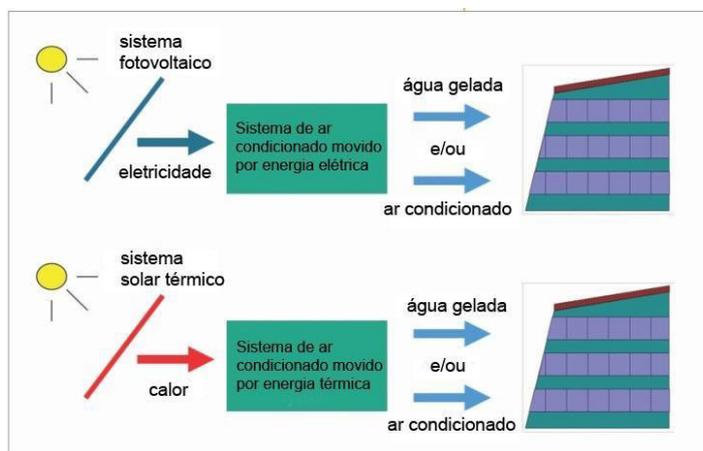


Figura 1- Tipos de AC solar

Os sistemas de AC Solar térmico são compostos por coletores solares de alto desempenho operando em temperatura entre 90^o C e 150^o C. Nessa aplicação, podem ser utilizados coletores solares planos especiais ou de tubos evacuados, além de coletores concentradores e refletores lineares de Fresnel.

A radiação solar disponível no local da instalação é absorvida pelos coletores solares que conduzem o calor, geralmente para um fluido de trabalho (água, ar ou outros). Em seguida, o chiller usa o calor desse fluido para geração de frio.

O princípio da refrigeração solar, proposto por Pridasawas e Lundqvist (2003), baseia-se em que todo calor, trabalho mecânico e eletricidade podem ser utilizados para movimentar um ciclo de refrigeração. Do ponto de vista termodinâmico, existem vários processos concebíveis para a transformação de irradiação solar em efeito de refrigeração. A escolha do tipo apropriado para uma aplicação em particular vai depender da demanda de refrigeração e da forma em que a energia de entrada (calor, eletricidade) esteja disponível, como é mostrado na Fig. 2.

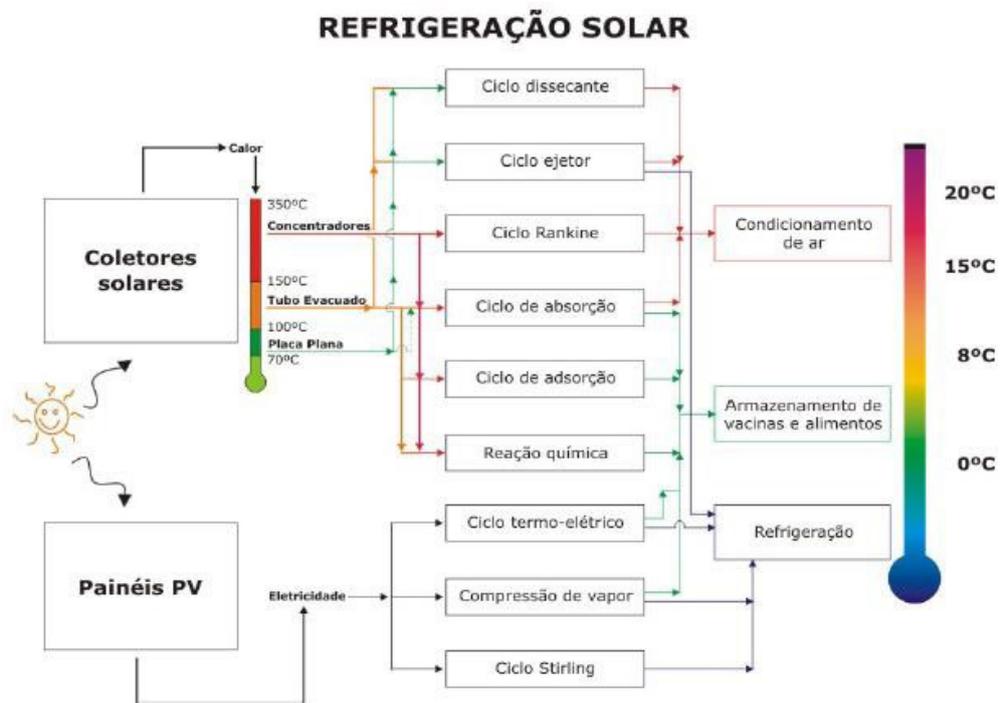


Figura 2 - Sistemas de Refrigeração Solar

2.1 Ciclo de Adsorção

Natecnologia de Refrigeração Solar por meio de ciclo de adsorção, são empregados adsorventes sólidos, sendo que os sistemas mais comuns utilizam os seguintes pares: sílica gel-água e zeolita-água. Esses materiais resolvem os problemas de corrosão e toxicidade associados às soluções comumente empregadas em absorção. Outra vantagem da adsorção é que ela possibilita trabalhar com temperaturas de geração em torno de 55°C.

A desvantagem é que tais ciclos não são contínuos, pois não se pode mover o

adsorvente em suas diferentes etapas. Usualmente são usados dois compartimentos com adsorvente, como mostrado na Fig. 3a e, dessa forma, tem-se um ciclo semicontínuo (Fig. 3b). Enquanto o adsorvente em um compartimento está sendo regenerado com a entrada de calor (lado direito da Fig. 3a), o outro compartimento está sendo usado para adsorver o vapor proveniente do evaporador.

Por suas características, os chillers por adsorção são mais caros, ocupam um espaço maior para a mesma capacidade e são menos eficientes que os chillers por absorção. Seu COP varia de 0,3 a 0,7. Por outro lado, eles são mais confiáveis e de maior vida útil e podem operar a temperaturas de geração mais baixas, o que facilitaria o uso de coletores solares planos.

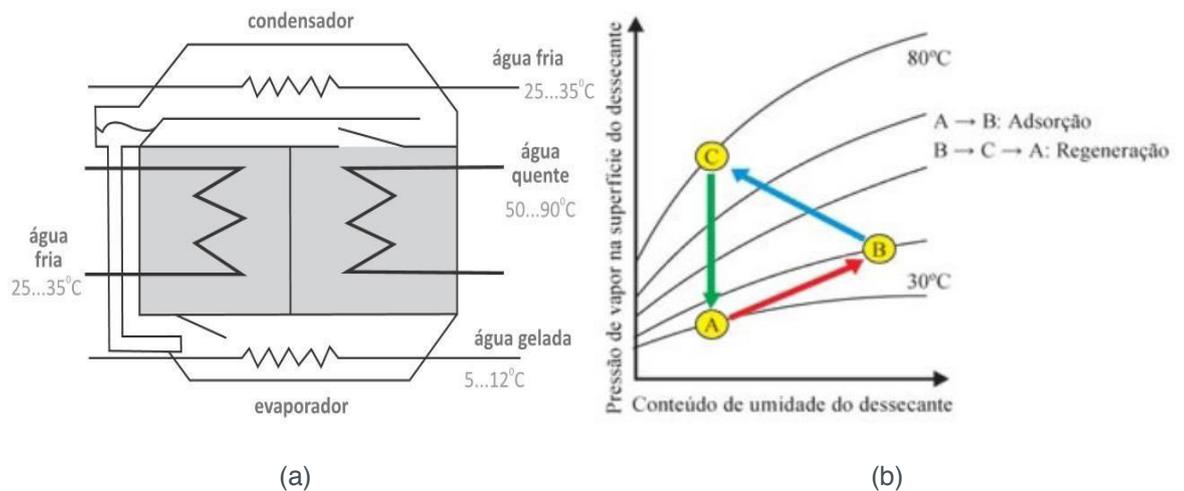


Figura 3 - Ciclo de refrigeração por adsorção

3 | LEVANTAMENTO DE CARGAS TÉRMICAS

As dependências do laboratório do GEPEN estão estabelecidas em uma área de 13,44 m², no piso do estacionamento descoberto do nível C do Campus da UNIBH Buritis (Belo Horizonte- MG). A Fig. 4 mostra a localização do laboratório anterior à instalação do sistema de refrigeração.



Figura 4 – Fotos do laboratório GEPEN antes da instalação do AC-Solar

A sala é composta de apenas um ambiente. Para avaliar as condições do local, visando o recebimento do sistema de condicionamento de ar solar, foram levantadas as características construtivas da edificação (dimensões, localização e tipos de janelas, materiais de paredes, teto e piso); bem como as cargas internas previstas (pessoas, sistema de iluminação e equipamentos). O resumo das características está disponível na Tab. 1.

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE
Equipamentos	10,8 W/m ² de Potência Instalada
Iluminação	64 W de Potência Instalada
Maquina AC	100 W de Potência Instalada
Pessoas	2
Nível de atividade	120 W por pessoa
Paredes em chapa de aço galvanizado com 40mm de poliestireno expandido e chapa de PVC de acabamento interno	
Janelas simples vidro com espessura de 3mm	

Tabela 01 – Características das cargas térmicas internas e características construtivas do espaço refrigerado

A carga térmica da sala de pesquisa foi calculada através de simulação computacional no programa EnergyPlus, onde todas as características do ambiente foram consideradas e foram seguidos os parâmetros estabelecidos no *Handbook of Fundamentals* da ASHRAE.

Os resultados da simulação computacional para as condições descritas são mostradas na Fig. 5. A maior demanda pelo resfriamento ocorre em Dezembro, Março, Janeiro e Fevereiro, respectivamente.



Figura 5 - Carga de pico para resfriamento anual – Sala de pesquisa/trabalho

3.1 Dimensionamento do sistema de aquecimento solar

Inicialmente, foi realizada simulação com o *software (Presizing tool for solar*

cooling, heating and DHW) PISTACHE, ferramenta livre, desenvolvida por TECSOL e CEA/ INES, no âmbito do projeto MeGaPICS. Esse programa destina-se ao pré-dimensionamento e avaliação do desempenho anual de instalações solares para refrigeração e aquecimento de água. O *software* PISTACHE utiliza como dados de entrada: parâmetros geométricos e materiais dos coletores solares selecionados; médias horárias anuais das informações meteorológicas do local em questão; cargas de resfriamento e de aquecimento, além da demanda de água quente requerida.

Nas simulações, foram utilizados parâmetros de sete modelos de seis diferentes fabricantes de coletores solares comercializados no país e com mais alto desempenho térmico, para atender aos níveis de temperatura necessários no AC Solar. Para o modelo de menor custo, foi estimada uma área coletora total de 44 m² com classificação A no Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO, mostrada na Fig. 6. As principais características do sistema de ar condicionado solar instalado no laboratório são apresentadas na Tab.2.

EQUIPAMENTO	COLETOR SOLAR	RT	CHILLER	FAN COIL
TIPO	Plano fechado	Horizontal	Adsorção	Expansão Indireta
MARCA/MODELO	PROSOL /Blue 8 1,0V	SOLIS- 1000 BPN	INVENSOR - LTC 10 Plus	FCTB-3
CAPACIDADE	1 m ²	1000 L	1,0 TR	1,0 TR
DIMENSÕES (LXCXH)	100x100 [cm]	2996x840 [mm]	110x75x137 [cm]	52x28x24 [cm]
EFICIÊNCIA (COP OU ENCE)	84,8 kWh-mês/m ²	0,10 kWh-mês/litro-	0,65	-

Tabela 2- Características do Sistema de Ar Condicionado Solar



Figura 6- Planta de aquecimento solar composta por 44m² de área coletora

3.2 Sistema de Resfriamento

Nessa instalação, não foi previsto um sistema auxiliar ao AC Solar (backup) para

entrada em operação em períodos de baixa insolação ou chuvosos. Tal decisão será reavaliada após investigação sobre as condições de conforto do ambiente climatizado. Tal avaliação tem grande potencial para definir novas formas de projetar sistemas de condicionamento ambiental, com vistas ao alcance de níveis de eficiência energética maiores, já que o controle de temperatura passa a ser mais dinâmico e ativado pelos próprios usuários. A Fig. 7 ilustra as características do chiller de adsorção utilizado.

GENERAL TECHNICAL SPECIFICATIONS		
Output range cooling	kW	4-14
COP maximum		0,75
Maximum overpressure	bar	4
Electrical connection	V~ Hz A	230 50/60 max. 8,5
Approx. electrical power consumption	W	395 (inkl. pumps)

SPECIFICATIONS AT NOMINAL CONDITIONS		CHILLING CIRCUIT	RECOOLING CIRCUIT	DRIVE CIRCUIT
COP maximum		0,65 / 0,7		
Performance values (nominal data / Hi-eFF)	kW	10 / 9	25,4 / 21,9	15,4 / 12,9
Temperatures - cooling system inlet (IN)	°C	18	27	72
Temperatures - cooling system outlet (OUT)	°C	15	31	67
Temperatures - possible application	°C	10-25	20-37	45-100
Volume flows	l/h	2.900	5.100	2.500
Available ext. pressure head	mbar	400	400	300

Figura 7- Características do Chiller de Adsorção - INVENSOR

O sistema recebe calor de uma fonte quente (*heating buffer vessel*), que corresponde a um reservatório térmico com capacidade de 1.000 litros, no circuito de alimentação (*driving circuit*). O chiller fornece frio através do circuito de água gelada (*chilled water circuit*) para alimentação do fancolet. A troca de calor para condicionamento do ar no container é feita com ajuda de um ventilador que opera em conjunto com o fancolet.

O rejeito do calor excedente (proveniente do sistema de resfriamento do chiller) é desprezado no circuito de recirculação (*re-cooling circuit*), através de um trocador de calor Ar-Água (*re-cooling unit*), parte integrante do chiller. O controle eletromecânico do sistema é bem simples e realizado por contatores. O sistema inicia a operação caso o termostato de parede seja acionado em uma das três posições possíveis. O termostato aciona o ventilador e habilita o chiller que, por sua vez, envia um sinal ao contator. Atendidas às condições de operação, o fancolet é ligado e o chiller aciona os circuitos de água quente, água gelada e rejeito de calor. Sempre que o usuário desligar manualmente o termostato, o ventilador também é desligado.

O sistema de aquecimento solar utilizado como fonte de calor opera ininterruptamente, utilizando controlador MICROSOL PLUS II para que a água circule nos coletores solares sempre que ocorrer níveis adequados de insolação.

Para instrumentação e aquisição de dados do sistema, foram utilizados os sensores de: Temperatura (termorresistências de platina (PT-100) com hastes de 200 mm e cabeçote de alumínio da marca Alutal); Vazão (medidor tipo turbina com transmissão

de sinal pulsada da marca Tecnofluid); Termohigrômetro (medidor de temperatura e umidade do ar com transmissor e indicador da marca Warme (transmissão 4 mA a 20 mA) para o monitoramento do ambiente climatizado) e Aquisição de dados (multímetro de varredura AGILENT 34972^a). A monitoração e tratamento dos dados coletados é realizado via *software* LABVIEW. A Fig. 8a apresenta o reservatório e o sistema de rejeito e a Fig.8b mostra o supervisor para acompanhamento e monitoração dos dados.



(a) (b)
Figura 8- Sistema de rejeito de calor e supervisor de controle

4 | ANÁLISE

A partir dos dados obtidos na monitoração, foram realizados os balanços de massa e de energia para determinação do desempenho dos sistemas. Em todos os casos, foram desprezadas as variações de energia cinética e potencial nos equipamentos. A Eq. 1 e a Eq. 2 fornecem, respectivamente, o calor útil e o trabalho de cada componente do sistema:

$$\dot{Q}_{util} = \sum_{Saída} (\dot{m} h)_{SAÍDA} - \sum_{ENT} (\dot{m} h)_{ENT} \quad (1)$$

$$\dot{W}_{util} = \sum_{ENT} (\dot{m} h)_{ENT} - \sum_{Saída} (\dot{m} h)_{SAÍDA} \quad (2)$$

Sendo \dot{m} : vazão mássica; h: entalpia específica, nos pontos de entrada (_{ENT}) e saída de cada equipamento. \dot{Q} e \dot{W} significam a taxa de transferência de calor e a potência consumida em compressores e ventiladores, respectivamente.

Para se determinar o Coeficiente de Desempenho (COP) do sistema de refrigeração foi utilizada a Eq. 3, aplicada em períodos de tempo (Δt_i):

$$COP = \frac{\sum_i \dot{Q}_f \Delta t_i}{Q_{RT}} \quad (3)$$

Sendo: \dot{Q}_f a taxa de geração de frio e Q_{RT} energia transferida do reservatório térmico no mesmo período.

A definição do EER “*Energy Efficiency Ratio*” inclui o consumo de energia elétrica (W) devido à utilização de bombas e ventiladores, sendo calculada pela Eq 4:

$$EER = \frac{\sum_i \dot{Q}_f \Delta t_i}{\sum_i \dot{W} \Delta t_i} \quad (4)$$

5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para exemplificar os resultados gerados, foi selecionado um dia de elevada irradiação solar incidente, apresentado na Fig. 9. As medições foram feitas com intervalo de 1 minuto e as temperaturas medidas no circuito de água quente para alimentação do chiller solar, água fria para a refrigeração do ambiente, rejeito e temperatura ambiente são mostradas na Fig. 10.



Figura 9- Irradiação solar incidente no plano dos coletores

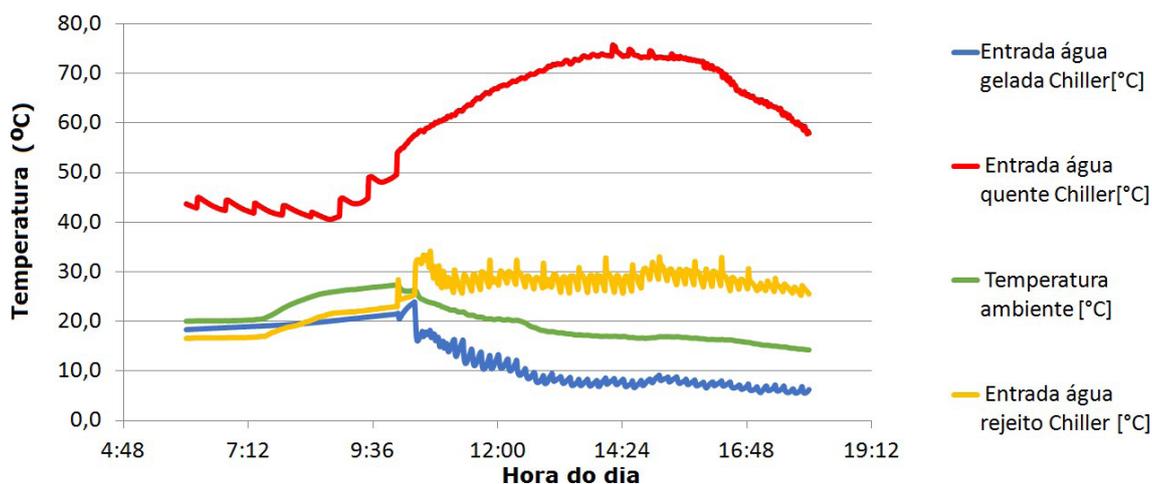


Figura 10- Evolução temporal dos valores das temperaturas em diferentes pontos da instalação

Os resultados obtidos estão consolidados na Tab.3, a partir do uso das Eqs. 1 a 4, para o dia selecionado.

DESCRIÇÃO	VALORES
Carga Térmica do Frio	115.266,02 [kJ]
Geração de Energia Total	142.370,98 [kJ]
Calor Útil	181.525,06[kJ]
COP (Térmico)	0,63
Energia Elétrica consumida	59.868 [kJ]
CEE	1,93
EER	0,48

Tabela 3- Características do sistema AC - Solar medido durante 24 horas

A Fig. 11 apresenta um gráfico com a temperatura ambiente medida durante parte do mês de julho de 2017. Por depender das variáveis climáticas os resultados relacionados à geração específica de frio/calor bem como o consumo elétrico variam em função da temperatura externa e da disponibilidade da radiação solar.

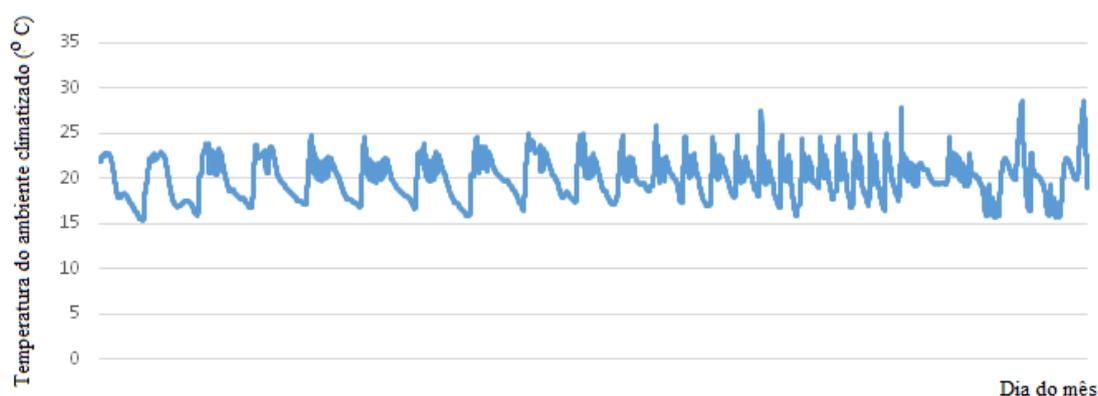


Figura 11- Evolução da temperatura ambiente entre os meses de julho de 2017

6 | CONCLUSÕES

O sistema foi considerado eficaz durante todo o período avaliado, mantendo a temperatura ambiente em condição de conforto térmico. Foram identificados alguns picos de temperatura no início da manhã (períodos em que não havia água quente no sistema devido à baixa radiação solar do horário).

O valor do COP igual a 0,63 é muito próximo aos valores de placa entre 0,65 e 0,67, conforme mostrado nas especificações técnicas da Fig.7.

Durante o desenvolvimento e implantação do projeto foram identificadas dificuldades e barreiras para a instalação dos sistemas piloto de Ar-condicionado solar, que possivelmente podem ser extrapoladas para outras iniciativas. Dentre eles deve-se considerar o alto custo dos chillers solares; elevadas taxas de impostos para importação de máquinas e componentes; falta de profissionais especializados em

condicionamento de ar solar e em integração de sistemas de engenharia envolvidos.

7 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CEMIG e ANEEL pelo financiamento do projeto P&D 438, à equipe de professores e bolsistas; a Minas Gerais Educação/UNA e ao Centro Universitário Belo Horizonte /UNIBH, assim como aos fornecedores IMAX Energia, PROTHERM, ATAC e LINK.

8 | REFERÊNCIAS

Alexandre, Fabio. Nista, Diego. **O Futuro em Chillers Centrífugos de Alta Eficiência Energética e Livres de Óleo nas Condensações a Ar e a Água até 2.500TR**. XVI Encontro Nacional de Empresas Projetistas e Consultores da ABRAVA, 2016.

DASOL-ABRAVA. Mesquita, L. **Ar condicionado movido a energia solar**. Revista SolBrasil - 1ª Edição. Julho, 2010

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso, ano base 2005: classe Residencial Relatório Brasil** - Sumário Executivo. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009. 187 p.

European Photovoltaic Technology Platform, 2007 ELETROBRÁS, Relatório Anual e de Sustentabilidade 2015.

EPE – Boletim de Estatística Mensal de Energia Elétrica 2004-2016. EPE. Nota Técnica DEA 13/14 - Demanda de Energia 2050. Agosto de 2014.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE) – **Consumo de Energia no Brasil. Análises Setoriais**. Rio de Janeiro, Junho de 2014

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese**, 2016. Ano Base 2015. IEA.

Mautner, F; Weiss, W; Spork-Dur, M. **Solar Heat Worldwide. Market and Contribution to the Energy Supply**. Solar Heating and Cooling Programme, International Energy Agency. Austria, 2016.

Neto, Ardile Bacchi . **Ar condicionado por adsorção: Tecnologia e desenvolvimento**. Disponível em:
<<http://www.engenhariaearquitetura.com.br/noticias/impressao/Default.aspx?noticia=997>>

Pridasawas, W.; Lundqvist, P. **Technical options for a solar-driven cooling system**. Proceeding of the International Solar Energy Congress 2003, Gothenburg, 2003.

Pereira, E. M. D.; Mesquita, L. C. S.; Pereira, C. M. D. **Aquecimento Solar no Brasil**. 25 de julho de 2014.

PERÉZ- Lombard, L.; Ortiz, J.; Pout, C. **A review on buildings energy consumption information**. Energy and Buildings 40, 2008, p.394-398. 87

Solid. Singapore: Second Largest Solar Cooling Installation Worldwide. Disponível em: <http://www.solarthermalworld.org/>, 2017 SHC Solar Update. Task 53 The Future of Solar Cooling. May 2016.

SOBRE O ORGANIZADOR:

Paulo Jayme Pereira Abdala possui graduação em Engenharia Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - RJ (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005) e pós-graduação em Gestão de Aviação Civil pela Universidade de Brasília (2003). Entre 1989 e 2008 foi Chefe do Laboratório de Ruído Aeronáutico e Emissões de Motores do DAC/ANAC, tendo desenvolvido centenas de estudos sobre poluição sonora e atmosférica oriundas da atividade aeronáutica. Foi representante oficial do Brasil em diversos Fóruns Internacionais sobre meio ambiente promovidos pela Organização de Aviação Civil Internacional OACI - Agência da ONU. Foi Coordenador dos Cursos de Engenharia de Produção, Elétrica, Civil e Mecânica na UNOPAR/PG entre 2013 e 2018. Atualmente é Consultor Independente para a AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, OACI e INFRAERO. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, meio ambiente e pedagogia (metodologia TRAINAIR/OACI).

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-066-7

