

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

DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SUPERHIDROFÓBICAS COM EFEITO AUTOLIMPANTE PARA APLICAÇÕES EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Aline Geice Vitor Silva

Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais

Belo Horizonte – Minas Gerais

Angela de Mello Ferreira

Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Departamento de Engenharia de
Materiais

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em
Recursos Minerais, água e Biodiversidade. INCT-
Acqua

Belo Horizonte – Minas Gerais

Lucélio Oliveira Lemos

Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Departamento de Engenharia de
Materiais

Belo Horizonte – Minas Gerais

Magnum Augusto Moraes Lopes de Jesus

mamlopes@hotmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Química

Belo Horizonte – Minas Gerais

RESUMO: O aproveitamento da energia solar que chega na superfície da terra, tanto como fonte de calor quanto de luz é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras. Os módulos fotovoltaicos estão sujeitos a ação da poluição, empoeiramento e demais fatores

naturais, que dificultam ou reduzem a incidência dos raios solares nas células, prejudicando seu rendimento. O desenvolvimento de superfícies de vidro hidrofóbicas e autolimpantes apresenta grande interesse na comunidade científica devido às suas diversas possibilidades de aplicações tecnológicas, dentre as quais vidros para módulos fotovoltaico. Neste estudo, uma superfície super-hidrofóbica foi desenvolvida através da deposição de um filme fino sobre superfície de um substrato de vidro utilizando-se tecnologia sol-gel. Um sol estável foi obtido usando tetraetilortossilicato (TEOS) como precursor e as deposições foram realizadas pelo processo de recobrimento por imersão (dip-coating). O efeito super-hidrofóbico foi obtido pela deposição de filmes finos de SiO_2 e funcionalização subsequente utilizando um tensoativo como agente de acoplamento. O revestimento depositado foi caracterizado em relação à energia de superfície através da avaliação do ângulo de contato e quanto à transmitância óptica por espectrofotometria UV-Vis. As medidas de ângulo de contato dos filmes finos antes e após funcionalização foram menores que 5° e 134° , respectivamente, confirmando o caráter hidrofílico inicial e hidrofóbico após funcionalização. A transmitância de vidro aumentou após o revestimento. Neste trabalho, um filme fino de sílica transparente e super-hidrofóbico livre de rachaduras foi obtido por

uma rota simples, com boa propriedade de autolimpeza.

PALAVRAS-CHAVE: Acúmulo de Sujidade, Filmes finos Autolimpantes, Funcionalização, Sílica.

ABSTRACT: The utilization of solar energy reaching the earth's surface, both as a source of heat and light, is now one of the most promising energy alternatives. The photovoltaic modules are exposed to the action of pollution, dusting and other natural factors that reduces the sunlight onto the cells, impairing their performance. The development of hydrophobic self-cleaning glazed surfaces is of great interest because of their various technological applications such as glasses for photovoltaic modules, cell phone, windshields of mobiles. In this study, a super-hydrophobic surface was developed by sol-gel technology. A stable sol was obtained using tetraethylorthosilicate (TEOS) as precursor and the depositions were performed by dip-coating process on a slide microscope glass as substrate. The super-hydrophobic effect was obtained by deposition of SiO₂ thin film and subsequent funcionalization using a surfactant as a coupling agent. The deposited coating was characterized in relation to contact angle and optical transmittance by UV-Vis spectrophotometry. The contact angle measurements of thin film before and after funcionalization was lower than 5° and 134° respectively, confirming the initial hydrophilicity and the hydrophobicity after funcionalization. The glass transmittance has been improved by the coating. In this work a transparent and super-hydrophobic thin film, free of cracks, has been obtained by a simple route with good self-cleaning property.

KEYWORDS: Dust accumulation, Self-cleaning thin films, Funcionalization, Silica.

1 | INTRODUÇÃO

A comunidade científica possui grande interesse na nanotecnologia devido às novas propriedades adquiridas pelos materiais antes não observadas em escala macroscópica. Um aspecto interessante e motivador para o estudo e desenvolvimento dos nanomateriais é a possibilidade de diminuição do seu tamanho mantendo a sua capacidade de operação. Esses materiais funcionais são projetados para aplicações específicas que requerem controle da sua estrutura em escala atômica com morfologia e dimensões controladas de acordo com as propriedades desejadas, como ressaltado por Ferreira et al, (2014).

Uma forma interessante de trabalhar com os nanomateriais é através da síntese de filmes finos nanoestruturados, onde as propriedades de superfície podem ser modificadas pela incorporação de grupos funcionais específicos ou pela introdução controlada de porosidade. Os revestimentos nanoestruturados se destacam por apresentarem novas propriedades físicas e químicas. De acordo com Zhang (2014), revestimentos com propriedade de autolimpeza, por exemplo, tem atraído atenção significativa da comunidade científica devido aos seus aspectos fundamentais e

às amplas aplicações práticas. Dentre elas podem-se citar vidros de janelas para ambientes climatizados, coletores solares, módulos fotovoltaicos, telas de dispositivos eletrônicos, etc.

Nesse sentido, os revestimentos autolimpantes podem prevenir ou minimizar o acúmulo de sujidades em painéis fotovoltaicos, além de aumentar a transmitância dos vidros destes módulos. Uma boa transmitância da superfície que recobre os módulos é fundamental o desempenho das células solares. A deposição da poeira produzida nos arredores devido à poluição ou fenômenos naturais está relacionada às condições ambientais nas quais a superfície está exposta. Normalmente onde os níveis de radiação são mais elevados existe baixo índice de precipitação de chuva e o efeito do acúmulo de sujidade, também conhecido como efeito *soiling*, é mais grave. A chuva pode reduzir a sujeira, pois produz a limpeza natural da superfície. De acordo com Sarver et al. (2013) e Sayyah et al. (2014), um dos problemas não considerados na implantação e operação da maioria dos sistemas solares é o impacto do acúmulo de sujidades como partículas de poeira ou sujeira em superfícies expostas ou intermediárias. Estes autores ainda ressaltam que o acúmulo de poeira e outras partículas em coletores solares pode provocar perdas significativas de transmissão em sistemas fotovoltaicos.

A Fig. 1 apresenta os módulos fotovoltaicos (PV) instalados na “University of Bahrain” (UoB). Segundo ALNASER et al. (2015) essa região é composta por 2.088 painéis fotovoltaicos, com área total de 3.400 m² cuja limpeza manual apresenta elevado custo para ser realizada.



Figura 1: Módulos fotovoltaicos PV instalados na “University of Bahrain” (UoB). Composta por 2.088 painéis fotovoltaicos (policristalino), área total de 3.400 m². FONTE: ALNASER et al, (2015).

A solução para minimizar o efeito da sujidade seria produzir uma superfície autolimpante para que, mesmo em regiões de pouca chuva, houvesse acúmulo menor de sujidades nos vidros e outras superfícies que estão sujeitas a esse tipo de aplicação. Segundo Vivar et al. (2008), as sujidades diminuem a transmitância

dos módulos fotovoltaicos devido ao espalhamento da radiação incidente, reduzindo a intensidade que chega à célula. Em particular, painéis fotovoltaicos com sistema ópticos concentradores (CPV) podem apresentar perda de até 26% de corrente gerada quando o painel está sujo.

Os recobrimentos autolimpantes estão divididos em duas categorias: superhidrofílico e superhidrofóbico. Os recobrimentos de ambos os tipos apresentam o efeito autolimpante com a ação da água, sendo o primeiro pelo espalhamento de água que carregam a sujeira para fora da superfície e o segundo pela formação de gotículas de água rolantes, como pode ser visto na Fig. 2.

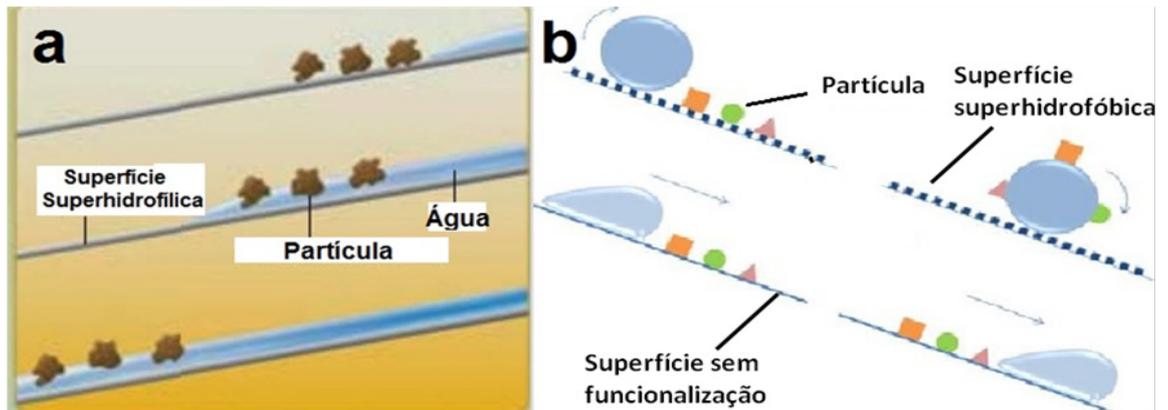


Figura 2– Recobrimento autolimpante superhidrofílico (a) e superhidrofóbico (b).

As superfícies autolimpantes apresentam uma molhabilidade especial (superhidrofilicidade ou superhidrofobicidade) e sua obtenção pode contribuir grandemente para a diminuição do acúmulo de sujidades sobre a superfície. A molhabilidade é uma propriedade importante de uma superfície sólida e o ângulo de contato é comumente utilizado para caracterizar sua molhabilidade, Fig 3. Uma superfície pode apresentar diferentes características dependendo da sua natureza física, como tensão superficial, ou dependendo da rugosidade e topologia da superfície.

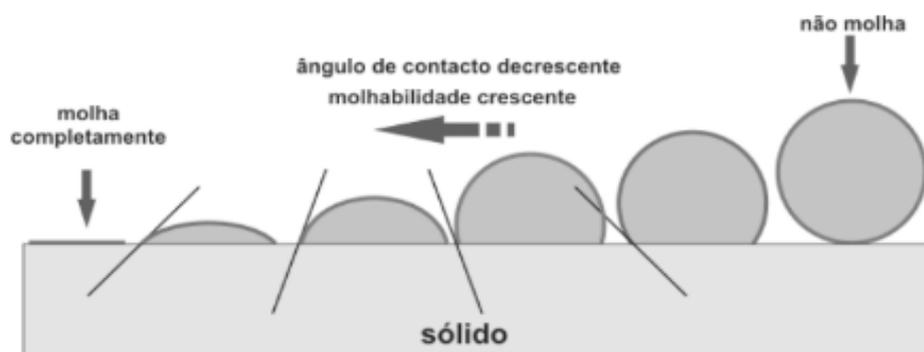


Figura 3: Molhabilidade e ângulo de contato.

FONTE: NETO, 2012.

O ângulo de contato (θ) CA que define a molhabilidade de uma superfície plana

pode ser calculado pela expressão de Young, Eq. (1).

$$\cos \theta = \frac{(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LG}} \quad (1)$$

Onde γ_{SG} é a tensão superficial interfacial para S(sólido)-G(gasoso), γ_{SL} para L(líquido)-G(gasoso) e γ_{LG} para G(gasoso)-L(líquido). O ângulo de contato é o ângulo entre a tangente da superfície da gota de água na interface líquido-gás e a superfície do material. Para o ângulo de contato (θ) maior que 90° a superfície é dita como hidrofóbica, se menor que 90° é dita hidrofílica, se maior que 150° é superhidrofóbica e se abaixo de 5° é superhidrofílica.

A partir dessa perspectiva, espera-se que os filmes finos de sílica modificados (SiO_2) possam proporcionar o efeito autolimpante durável aos painéis fotovoltaicos sem afetar significativamente a transmitância dos mesmos. Muitas estratégias têm sido desenvolvidas através da aplicação de filmes finos para modificar as propriedades de superfícies e interfaces, tais como as técnicas sol-gel e evaporação e-beam. Entre elas, a tecnologia sol-gel se destaca devido à operação simples e por apresentar custo e impacto ambiental relativamente baixos. Segundo Brinker & Scherer (1990) a formação da película fina pelo método sol-gel envolve a preparação de um sol, deposição do sol sobre uma superfície, formação de um estado gel e secagem do gel. Para obtenção de recobrimentos com propriedades autolimpantes é importante que os reagentes utilizados na síntese sol-gel tenham elevada pureza. O processo sol-gel permite a produção de materiais cerâmicos, vidro, vitrocerâmica e compósitos a baixa temperatura, com elevada pureza e homogeneidade. Este processo ocorre à baixa temperatura, possibilita o controle da morfologia e, sobretudo a porosidade do produto final. Devido a essas vantagens, ele tem sido bastante utilizado na área de recobrimento.

A grande contribuição desse trabalho está em desenvolver uma superfície superhidrofóbica para a aplicação em painéis solares. Nesse sentido, estão sendo estudadas possibilidades de modificação das superfícies dos vidros via funcionalização por meio da deposição de filmes funcionais capazes de conferir à superfície a propriedade autolimpante, minimizar o efeito do acúmulo da sujeira e aumentar a refletância em painéis solares. Além desses efeitos este recobrimento deve apresentar características tais como durabilidade; transparência no intervalo de 300- 1700 nm, que é a região do espectro importante para o funcionamento da célula fotovoltaica; baixo custo; facilidade de aplicação em longas superfícies, entre outras.

2 | OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de filmes finos de sílica funcionalizada através da tecnologia sol-gel visando obter superfícies superhidrofóbicas e autolimpantes para aplicações em módulos fotovoltaicos.

3 | METODOLOGIA

A obtenção dos filmes finos hidrofóbicos foi realizada em duas etapas. Primeiramente pela deposição de SiO_2 sobre substratos de vidro a partir do método sol-gel via imersão por processo de *dip-coating* para obtenção de filmes hidrofílicos. Em seguida, foi realizada a funcionalização da superfície hidrofílica utilizando-se composto organossilano. Os substratos de vidro utilizados foram previamente limpos com água e detergente para remoção da gordura e embebidos em etanol sob ultrassom por 15 minutos. Para obtenção dos filmes de sílica, uma solução utilizando tetraetilortosilicato (TEOS) foi preparada de acordo com a rota estabelecida por Lopes de Jesus (2015). Nessa solução, foi utilizado TEOS como precursor, isopropanol como solvente e ácido clorídrico como catalisador. As amostras foram recobertas por *Dip-coating* utilizando-se um equipamento da Marconi (MA 765), como ilustrado na Fig. 4. Os substratos de vidro foram imersos na solução de TEOS) a uma velocidade constante de 3,7 mm/s. Após esta etapa, os filmes foram secos em estufa a 100 ° C. Após a deposição dos filmes foi feito o tratamento térmico das amostras a 500°C por 2 horas.

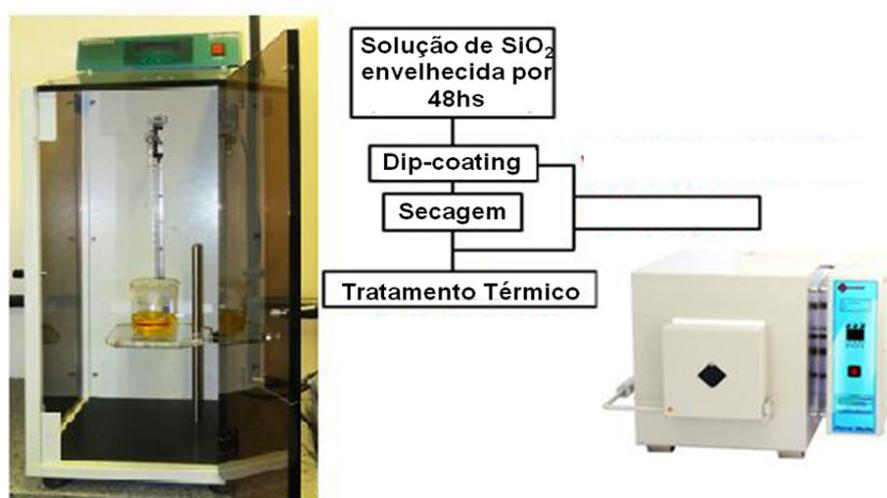


Figura 4 – Fluxograma do processo de recobrimento dos filmes de SiO_2 . FONTE: NETO, 2012.

O procedimento de funcionalização foi realizado a partir da imersão dos substratos recobertos por filmes de sílica em solução alcoólica de organossilano, onde as amostras foram imersas por 30 min. Após a funcionalização as amostras foram colocadas em ultrassom por 5min em acetona e em água destilada, sequencialmente

para retirada do excesso de reagente modificador e maior durabilidade das mesmas.

Os filmes foram caracterizados quanto às propriedades ópticas através das medidas da transmitância no espectrofotômetro de luz UV/VIS VARIAN CARY 50 na região ultravioleta/visível (200-1000nm). As medidas do ângulo de contato foram obtidas a partir de um medidor de ângulo de contato da marca KRUSS DS 100. O volume da gota utilizado foi de 2 a 5 μ L. A medida foi realizada após a estabilização do valor de ângulo de contato da gota sobre a superfície para avaliação do caráter hidrofílico e hidrofóbico.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 5 mostra a comparação entre as superfícies antes e após a funcionalização, sendo a Fig. 5a o substrato de vidro sem revestimento, a Fig. 5b após a deposição de sílica, tornando a superfície do vidro superhidrofílica e a Fig. 5c após a funcionalização da superfície de sílica com tensoativo como agente de acoplamento, tornando-a hidrofóbica.

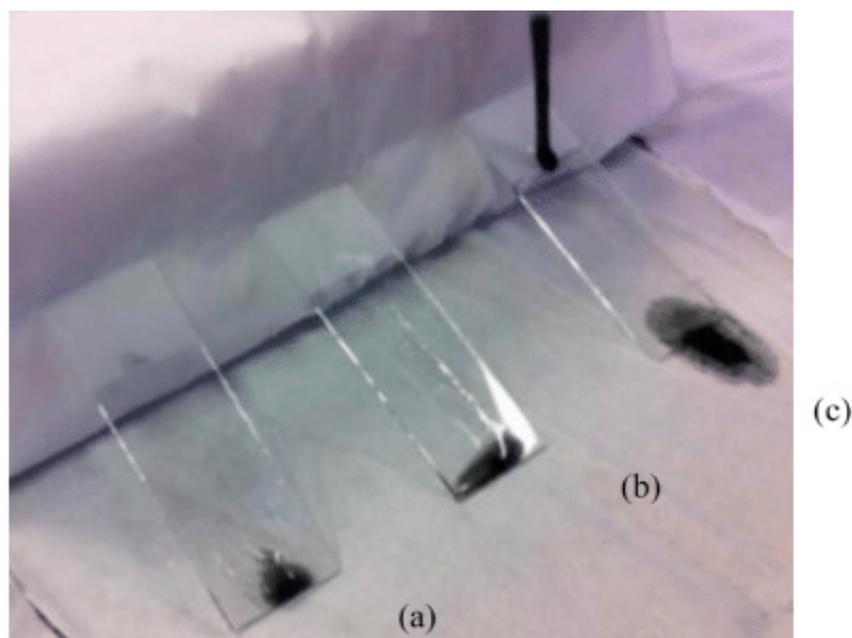


Figura 5 – (a) Vidro sem recobrimento. (b) Vidro com 1 camada de sílica. (c) Vidro com 1 camada de sílica funcionalizado com organossilano.

Após simular a deposição de sujeira com partículas de carvão ativado, observa-se nitidamente o caráter autolimpante da superfície hidrofóbica, pois toda a sujeira inserida na superfície não se acumula sobre o vidro, escorrendo totalmente, deixando-o sempre limpo.

4.1 Filmes superhidrofílicos de SiO₂

A solução se apresentou bastante homogênea e estável, confirmando a

estabilidade e a reprodutibilidade dessa rota. Após o recobrimento via sol-gel, as amostras se mostraram superhidrofílicas. As amostras de SiO_2 produzidas a partir da solução de TEOS, após 48 horas de envelhecimento em temperatura ambiente, se mostraram livres de trincas, e transparentes. Medidas de ângulo de contato (AC) das amostras foram realizadas após recobrimento de SiO_2 , como pode ser observado na Fig. 6.

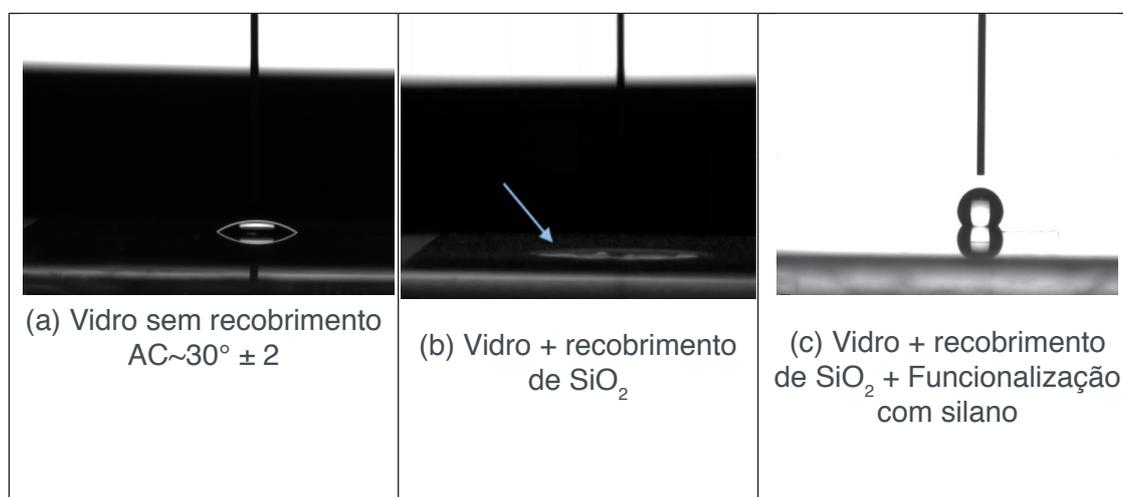


Figura 6 – Medidas de ângulo de contato das amostras de vidro antes (a) e após recobrimento com filme fino de SiO_2 (b) e após funcionalização com organossilano (c).

As amostras com 1 camada de sílica apresentaram medidas de ângulos de contato abaixo de 5° (Fig. 6b), o que caracteriza superhidrofilidade, como mencionado por Yao e He, (2014), e sugere a disponibilidade das hidroxilas (OH) que servirão de pontos de ancoramento ao processo posterior de funcionalização. O vidro utilizado como substrato sem recobrimento (Fig. 6a) apresentou ângulo de contato de 30°. O revestimento do substrato de vidro com os filmes finos de SiO_2 mudou claramente a hidrofilicidade do mesmo.

Após a funcionalização dos filmes de sílica através da imersão das amostras em solução contendo a solução alcoólica do organossilano, as amostras se mostraram livres de trincas e transparentes. Além disso, o comportamento hidrofóbico desejado foi obtido, conforme pode observado através da Fig. 6c. Após a funcionalização das amostras, foram encontrados ângulos de 134°. Segundo Ajami et al. (2011), Wang e Lieberman (2003) e Li et al. (2012), a introdução de organossilanos na superfície do vidro proporciona valores de ângulos de contato de 108° a 120°. De fato esses valores foram encontrados no presente trabalho, porém após a lavagem com água e acetona em ultrassom, o valor do ângulo de contato se elevou ainda mais.

4.2 Transmitância e Refletância

De acordo com Nascimento (2007) os filmes de SiO_2 podem conferir propriedade anti-refletora ao vidro, aumentando a sua transmitância na região do visível. Essa

propriedade foi avaliada para as amostras de vidro com recobrimento de filmes finos de SiO_2 obtidas. A Fig. 7 mostra o espectro de transmitância das amostras na região de 200 a 1000nm. Observou-se que a amostra com 1 recobrimento de SiO_2 apresentou um ganho em torno de 2% de transmitância ao longo do espectro e, após a funcionalização, os filmes de sílica não apresentaram perda de transmitância. Alguns autores também reportaram ganhos de transmitância expressivos com a aplicação de uma camada de SiO_2 . Fujishima et al. (2008) obtiveram um ganho de 4,4% na transmitância do vidro com a aplicação de uma camada de nanopartículas de SiO_2 de 123nm. Çamurlu et al. (2009) obtiveram um ganho de 6% na transmitância do vidro com a aplicação de uma camada de SiO_2 de 89nm.

Os filmes de SiO_2 tratados antes e após funcionalização com o organossilano apresentaram transmitância elevada ($> 80\%$) na região do visível e infravermelho próximo (370-2100 nm), cuja propriedade é fundamental na aplicação na área de energia solar. O objetivo principal do presente trabalho é a autolimpeza e os resultados de transmitância revelam que a hidrofobicidade proporcionada pelo filme não comprometeu a transmitância do vidro e ainda a aumentou. Esse resultado é muito significativo, visto que recobrimentos semelhantes utilizando dióxido de titânio, por exemplo, que também são utilizados para autolimpeza, segundo Lopes (2015), comprometem a transmitância reduzindo-a em até 10%.

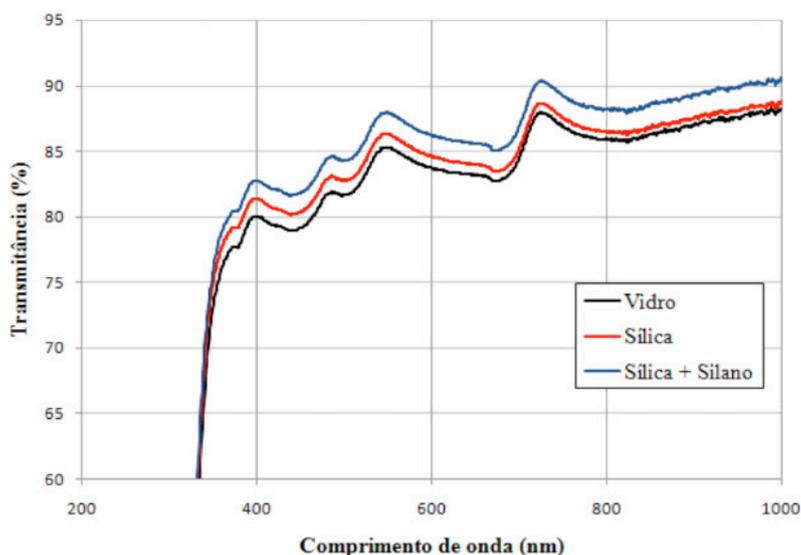


Figura 7 – Espectro de transmitância UV-Vis dos filmes de SiO_2 , antes e após funcionalização com tensoativo em função do comprimento de onda (nm).

O espectro de refletância total dos filmes de SiO_2 antes e após funcionalização pode ser visto na Fig. 8. Foi observado que deposição da camada de sílica proporciona o aumento da transmitância dos filmes e a diminuição da refletância. Isso ocorre porque o material depositado é menos denso que o substrato e essa densificação aumenta o índice de refração do material. Um maior índice de refração do material resulta em uma menor transmitância e torna o material mais reflexivo, como mencionado por Luo

et al. (2011).

À medida que a quantidade de SiO_2 (índice de refração $\text{SiO}_2 = 1,45$) aumenta nos filmes, os filmes se tornam menos reflexivos, pois o índice de refração dos filmes também diminui (índice de refração do substrato de vidro = 1,5).

Esse efeito pode ser explicado a partir do desenvolvimento da Eq. (2).

$$A + R + T = 1 \quad (2)$$

Onde A é a absorvância, R refletância e T transmitância.

Considerando que os filmes finos têm uma absorção desprezível a Eq. (2) se torna a Eq. (3), isolando-se T:

$$T = 1 - R \quad (3)$$

A partir do desenvolvimento de algumas equações (FANDERLIK, 1983), a refletância R do material pode ser definida pela Eq. (3):

$$R = \left(\frac{n_1^2 - n_0 \cdot n_2}{n_1^2 + n_0 \cdot n_2} \right)^2 \quad (4)$$

Onde n_1 = índice de refração do filme, n_0 = índice de refração do ar e n_2 = índice de refração do vidro.

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (3) se obtém a Eq. (5), conhecida como equação de Fresnel (FANDERLIK, 1983).

$$T = 1 - \left(\frac{n_1^2 - n_0 \cdot n_2}{n_1^2 + n_0 \cdot n_2} \right)^2 \quad (5)$$

A partir da Eq. (4), observou-se que o índice de refração do filme está relacionado de forma diretamente proporcional à sua refletância. Assim, filmes com maior quantidade de sílica apresentam menor índice de refração e, conseqüentemente, menor refletância (de acordo com a Eq. (4)) e maior transmitância (de acordo com a Eq. (5)).

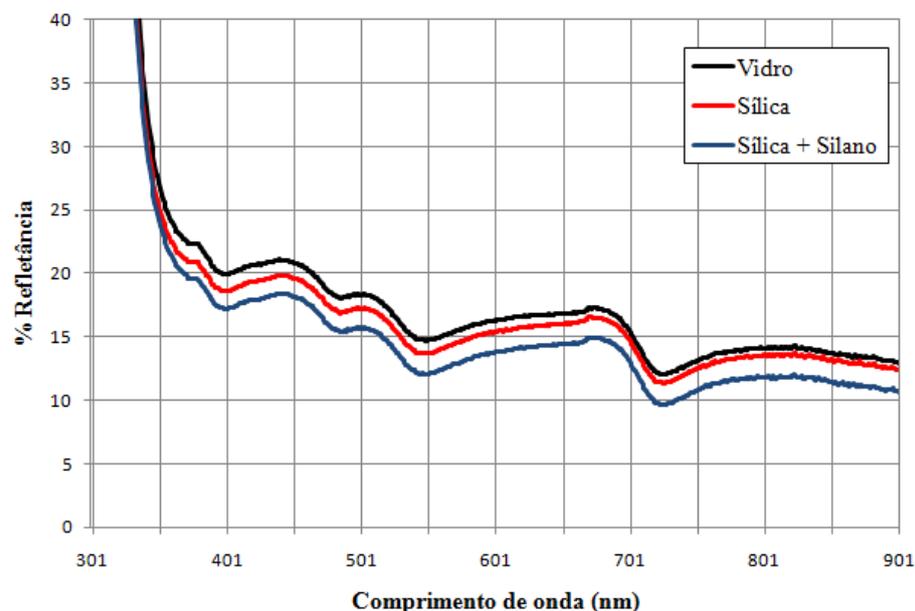


Figura 8 – Curva da variação de reflectância em função do comprimento de onda (nm).

5 | CONCLUSÃO

O recobrimento de sílica funcionalizado de caráter superhidrofóbico, capaz de tornar a superfície do vidro autolimpante para utilização principal em painéis fotovoltaicos foi obtido com sucesso. O processo de modificação da superfície do vidro tornando-o autolimpante é relativamente simples e promove a redução de sujeira acumulada em período de pouca chuva, pois esta superfície se limpa apenas com poucas gotículas de água. Os filmes desenvolvidos poderão reduzir os custos de manutenção de limpeza de sistemas fotovoltaicos instalados devido à prevenção ou minimização do acúmulo de neve, sujidades e poluentes presentes no ar.

O recobrimento autolimpante apresenta grande potencial de aplicações em diversos setores como automotivo (vidros, carrocerias de automóveis, coberturas de lâmpadas e espelhos); construção (vidros, fachadas, portas e perfis de janelas, telhados de plástico e pérgulas); domésticos (acessórios de cozinha e torneiras); aplicações marítimas (proteção anti-corrosão); aeroespacial (antiaderente e superfícies gelofóbicas); aplicações ópticas (câmeras, lentes, telescópios, sensores ópticos, painéis solares). Este trabalho continua com os testes *soiling*, ou seja, avaliação de desempenho das superfícies autolimpantes com amostras expostas às intempéries numa região urbana, no caso, Belo Horizonte, no Campus II do CEFET-MG, ao lado de uma avenida de grande tráfego com emissões consideráveis de poluentes. Além disso, os autores deste projeto continuam avaliando as propriedades mecânicas deste recobrimento a fim de avaliar sua resistência ao risco e sua aderência à superfície.

6 | AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CEFET/MG pelo apoio financeiro e ao INCT-Acqua pela infraestrutura concedida.

7 | REFERÊNCIAS

- Ajam, E., Francois, K., Aguey, Z., 2011. **Formation of OTS self-assembled monolayers at chemically treated titanium surfaces**, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, vol. 22, pp. 1813-1824.
- Alnaser, N. W., Dakhel A. A., Al Othman, M. J., Batarseh, I., Lee, J.K., Najmail, S., Alnaser, W. E., 2015. **Dust Accumulation Study on the Bapco 0.5 MW PV Project at University of Bahrain**, International Journal of Power and Renewable Energy Systems, vol. 2, pp. 38-54.
- Brinker, C., Scherer, G., 1990. **The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing**. Academic Press.
- Çamurlu, H. E., Kesmez, O., Burunkaya, E.; Arpaç, E., 2009. **Sol-gel preparation and characterization of anti-reflective and self-cleaning SiO₂-TiO₂ double-layer nanometric films**, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 93, pp. 1833-1839.
- Fanderlik, I., 1983. **Optical properties of glass**. Glass Science and Technology, vol.5.
- Ferreira, A. M., Silva, G. C., Duarte, H. A., 2014. **Materiais Funcionais para a Proteção Ambiental**. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, vol. 8, pp. 30-38.
- Fujishima, A., Liu, Z., Zhang, X., Murakami, T., 2008. **Sol-gel SiO₂/TiO₂ bilayer films with self-cleaning and antireflection properties**, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 92, pp. 1434-1438.
- Li, Z., Yoon, R., 2012. **Thermodynamics of hydrophobic interaction between silica surfaces coated with silanes**, Journal of Colloid and Interface Science, vol. 392, pp. 369-375.
- Lopes de Jesus, M. A. M., 2015. **Desenvolvimento de superfícies autolimpantes superhidrofílicas e fotocatalíticas obtidas pela deposição de filmes finos de TiO₂ e TiO₂/SiO₂ pelo método sol-gel**, Dissertação de Mestrado, DEMAT, CEFET/MG, Belo Horizonte.
- Lopes de Jesus, M. A. M., Ferreira, A. M., Neto, J. T. S., Timò, G. Paiva, P. R. P., Dantas, M., 2015. **Superhydrophilic self-cleaning surfaces based on TiO₂ and TiO₂/SiO₂ composite films for photovoltaic module cover glass**, Applied Adhesion Science, vol. 3, pp.3-5.
- Luo, C., Chuang, L., Yang, S., 2011. **The structure and mechanical properties of thick rutile-TiO₂ films using different coatings treatments**, Applied Surface Science, vol. 258, p. 297-303.
- Nascimento, G. L. T., 2007. **Caracterização de ORMOSILs na forma de monólitos e filmes finos preparados pelo processo sol-gel para aplicações ópticas**, Tese de Doutorado, Química, UFMG, Belo Horizonte.
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., Kazmerski, L., 2013. **A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 22, pp. 698-733.
- Sayyah, A., Horenstein, M., Mazumder, M., 2014. **Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels**, Solar Energy, vol. 107, pp. 576-604.

- SILVA NETO, J. T., 2013. **Propriedades ópticas e estruturais de filmes finos de TiO₂ produzidos pelo processo sol-gel**. Dissertação de Mestrado DEMAT, CEFET/MG, Belo Horizonte. Vivar, M., Herrero, R., Moretón, R., Moreno, F. M., Sala, G., 2008. Effect of soiling on PV concentrators: Comparison with flat modules, Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Wang, Y., Lieberman, M., 2003. **Growth of Ultrasmooth Self-Assembled Monolayers on SiO₂**, Langmuir, vol. 19, pp. 1159-1167.
- Yao & He, 2014. **Recent progress in antireflection and self-cleaning technology – From surface engineering to functional surfaces**, Progress in Materials Science, vol. 61, pp. 94–143.
- Zhang, et al., 2014. **Multifunctional antireflection coatings based on novel hollow silica – silica nanocomposites**. Applied Materials and Interfaces, vol. 3, pp. 1415-1423.

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

