

Energia Solar e Eólica 2

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

 **Atena**
Editora

Ano 2019

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

Energia Solar e Eólica 2

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 2 [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-067-4

DOI 10.22533/at.ed.674192201

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
ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NOS CAMPI IFG ITUMBIARA E URUAÇU	
Sergio Batista da Silva Olívio Carlos Nascimento Souto Fernando Nunes Belchior Ghunter Paulo Viajante Elias Barbosa Macedo Vera Ferreira Souza	
DOI 10.22533/at.ed.6741922011	
CAPÍTULO 2	24
ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA INTEGRADA EM UM SHOPPING CENTER DE FORTALEZA - CE	
Sofia da Costa Barreto Paulo Cesar Marques de Carvalho	
DOI 10.22533/at.ed.6741922012	
CAPÍTULO 3	41
ESTUDO DO COMPORTAMENTO E QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DO ABACAXI SECADO EM SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Raphaela Soares da Silva Camelo Juliana Lobo Paes Milena Araujo Silva Madelon Rodrigues Sá Braz Dhiego Santos Cordeiro da Silva Camila Lucas Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.6741922013	
CAPÍTULO 4	54
ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS SOBRE O CUIINSE ₂ E SUA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS	
Yuri Hamayano Lopes Ribeiro Denis Gilbert Francis David Marcus Vinícius Santos da Silva Jailton Souza de Almeida	
DOI 10.22533/at.ed.6741922014	
CAPÍTULO 5	66
EXPERIÊNCIA DE CURSO GRATUITO DE INSTALADOR DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE OFERECIDO PELO IFTO CAMPUS PALMAS	
Claudio Silva dos Santos Abimael Ribeiro Martins Adail Pereira Carvalho Brunno Henrique Brito	
DOI 10.22533/at.ed.6741922015	
CAPÍTULO 6	78
IMPACTO DA LEI PALMAS SOLAR NA ANÁLISE FINANCEIRA DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO	
Isamara Quirino de Castro Carlos Brunno Henrique Brito	

Felipe Tozzi Bittencourt
DOI 10.22533/at.ed.6741922016

CAPÍTULO 7 91

IMPACTOS DOS INCENTIVOS DOS GOVERNOS DO ESTADO E DO MUNICÍPIO NA MICROGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO

Allan Carlos do Nascimento Silva
Brunno Henrique Brito

DOI 10.22533/at.ed.6741922017

CAPÍTULO 8 104

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE DOIS GERADORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS DIRETAMENTE NO BARRAMENTO C.C. DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS HÍBRIDOS/MINIRREDES (GEDAE/UFPA)

Jorge Augusto Leal Corrêa
Claudomiro Fábio de Oliveira Barbosa
Marcos André Barros Galhardo
João Paulo Alves Veríssimo
Israel Hidai Lobato Lemos
Edinaldo José da Silva Pereira
João Tavares Pinho

DOI 10.22533/at.ed.6741922018

CAPÍTULO 9 121

INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Elismar Ramos Barbosa
Merlim dos Santos Ferreira de Faria
Fabio de Brito Gontijo

DOI 10.22533/at.ed.6741922019

CAPÍTULO 10 132

INFLUÊNCIA DO ESPECTRO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CÉU LIMPO, CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E CÉU NUBLADO

Guilherme Marques Neves
Waldeir Amaral Vilela
Enio Bueno Pereira
Luiz Angelo Berni

DOI 10.22533/at.ed.67419220110

CAPÍTULO 11 146

INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA ATRAVÉS DE GERADOR DE VÓRTICE LONGITUDINAL DO TIPO DELTA

Felipe Augusto Santos da Silva
Leandro Oliveira Salviano

DOI 10.22533/at.ed.67419220111

CAPÍTULO 12 161

METODOLOGIA COMPUTACIONAL DE CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

Marcus Vinícius Contes Calça
Matheus Rodrigues Raniero
Alexandre Dal Pai
Carlos Roberto Pereira Padovani
Domingos Mario Zeca Fernando

CAPÍTULO 13 174

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ABRIGOS DE PONTOS DE ÔNIBUS NA AV. ALMIRANTE BARROSO – BELÉM/PA

Ana Laura Pinheiro Ruivo Monteiro
Edinaldo José da Silva Pereira
Everton Leandro Santos Amaral
Ítalo de Sousa
Magda Tayane Abraão de Brito

DOI 10.22533/at.ed.67419220113

CAPÍTULO 14 191

PROJETO PRELIMINAR DE UM RADIÔMETRO ABSOLUTO PARA MEDIR A IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL

Franciele Carlesso
Jenny Marcela Rodriguez Gomez
Luiz Angelo Berni
Graziela da Silva Savonov
Luis Eduardo Antunes Vieira
Waldeir Amaral Vilela
Edson Luiz de Miranda

DOI 10.22533/at.ed.67419220114

CAPÍTULO 15 200

PROJETO, DESENVOLVIMENTO E TESTE DE FOGÕES SOLARES

Diego Lopes Coriolano
Erico Diogo Lima da Silva
Iraí Tadeu Ferreira de Resende
Vanina Cardoso Viana Andrade
Denilson Pereira Gonçalves
Renan Tavares Figueiredo
Odélsia Leonor Sanchez de Alsina

DOI 10.22533/at.ed.67419220115

CAPÍTULO 16 213

PROPOSTA DE RETROFIT NO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E ESTUDO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UM DOS BLOCOS DA UTFPR EM CURITIBA

Larissa Barbosa Krasnhak
Jair Urbanetz Junior

DOI 10.22533/at.ed.67419220116

CAPÍTULO 17 229

PROPOSTA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA OTIMIZAÇÃO DO GASTO PÚBLICO COM O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA UNIDADE DE ENSINO FEDERAL IMPLANTADA NA REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO

Adriano Moraes da Silva
Rebeca Lorena Santos Maia e Silva
Danielle Bandeira de Mello Delgado

DOI 10.22533/at.ed.67419220117

CAPÍTULO 18 246

PLATAFORMA PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO PARA A AQUISIÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Júlio César Madureira Silva
Augusto César da Silva Bezerra
Claudinei Rezende Calado
Ana Luiza F. Maia
Amanda Ribeiro Amorim

DOI 10.22533/at.ed.67419220118

CAPÍTULO 19 255

SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE DADOS EM SERVIDOR REMOTO UTILIZANDO PLATAFORMAS OPEN SOURCE RASPBERRY PI E ARDUINO

José Ilton de Oliveira Filho
Wilk Coelho Maia

DOI 10.22533/at.ed.67419220119

CAPÍTULO 20 263

SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM GOIÂNIA: MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Pedro Victor Valadares Romanholo
Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Enes Gonçalves Marra
Sérgio Pires Pimentel

DOI 10.22533/at.ed.67419220120

CAPÍTULO 21 275

TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS SOLARIMÉTRICOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA EMC/UFG

Jéssica Alice Alves da Silva
Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Sérgio Pires Pimentel
Enes Gonçalves Marra

DOI 10.22533/at.ed.67419220121

CAPÍTULO 22 290

TESTES DE SENSIBILIDADE PARA DIFERENTES PARAMETRIZAÇÕES CUMULUS DO MODELO WRF PARA MELHORAR AS ESTIMATIVAS DE VENTO

Lucia Iracema Chipponelli Pinto
Francisco Jose Lopes de Lima
Fernando Ramos Martins
Enio Bueno Pereira

DOI 10.22533/at.ed.67419220122

CAPÍTULO 23 303

O ENSINO SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA NAS UNIVERSIDADES BRASILEIRAS

André Barra Neto
Ana Paula Pinheiro Zago
Márcia Helena da Silva
Mirian Sousa Moreira
José Eduardo Ferreira Lopes

DOI 10.22533/at.ed.67419220123

CAPÍTULO 24	317
POTENCIALIDADE DO BIOGÁS GERADO PELA CODIGESTÃO ENTRE DEJETO BOVINO E SUÍNO	
<ul style="list-style-type: none"> Juliana Lobo Paes Camila Ferreira Matos Gabriel Araújo e Silva Ferraz Giancarlo Bruggianesi Camila Kelly de Queiroz Caroline Stephanie Gomes de Castro Soares 	
DOI 10.22533/at.ed.67419220124	
CAPÍTULO 25	333
SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA OTEC DE CICLO FECHADO OPERANDO NO BRASIL	
<ul style="list-style-type: none"> Marcus Godolphim de Castro Neves Hélio Henrique Rivabene Ferreira Dias Cassio Roberto Macedo Maia Ricardo Alan Verdú Ramos 	
DOI 10.22533/at.ed.67419220125	
CAPÍTULO 26	344
ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE 24 MESES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE NO ESTADO DO TOCANTINS	
<ul style="list-style-type: none"> Brunno Henrique Brito Thálisson Câmara Belém Márcio Serafim de Almeida Felipe Tozzi Bittencourt 	
DOI 10.22533/at.ed.67419220126	
CAPÍTULO 27	359
ESTUDO TECNOLÓGICO DE SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS	
<ul style="list-style-type: none"> Robson de Souza Santiago Bruno Lindbergh Sousa Yordanka Reyes Cruz Estevão Freire Suely Pereira Freitas Gisel Chenard Díaz 	
DOI 10.22533/at.ed.67419220127	
CAPÍTULO 28	376
INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM AEROPORTOS SOBRE A SEGURANÇA DAS OPERAÇÕES AERONÁUTICAS	
<ul style="list-style-type: none"> Francisco Wilson Falcão Júnior Paulo Cesar Marques de Carvalho Wilson Cabral de Sousa Júnior 	
DOI 10.22533/at.ed.67419220128	
SOBRE O ORGANIZADOR	390

ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS SOBRE O CuInSe_2 E SUA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

Yuri Hamayano Lopes Ribeiro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia
Feira de Santana – Bahia

Denis Gilbert Francis David

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física
Salvador – Bahia

Marcus Vinícius Santos da Silva

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física
Salvador – Bahia

Jailton Souza de Almeida

Universidade Federal da Bahia, Instituto de Física
Salvador – Bahia

RESUMO: As demandas energéticas mundiais têm levantado discussões em torno do uso de fontes de energia renováveis e fomentado pesquisas acerca da conversão fotovoltaica. Com isso, um dos concernimentos dessa área é a diminuição do custo de produção da energia com a busca de novas tecnologias para o desenvolvimento de células solares. Uma dessas tecnologias utiliza filmes finos de CuInSe_2 (CIS) na confecção da camada absorvedora dos dispositivos fotovoltaicos. Tomando essa direção, este trabalho propôs-se a estudar as propriedades físicas do CIS, desenvolvendo cálculos teóricos através de DFT a partir da parametrização PBE e também do potencial de troca mBJ. Foram obtidos

resultados para a densidade de estados e a óptica para o CIS bulk – esses foram comparados com resultados experimentais de XPS para a banda de valência e medidas de elipsometria para a função dielétrica. Além disso, o trabalho também apresenta o desenvolvimento de um dispositivo fotovoltaico baseado em filmes finos de $\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO), In_2Se_3 (IS) e CIS. Estes dois últimos materiais foram crescidos por eletrodeposição e caracterizados por EDS e MEV. O dispositivo foi caracterizado através de medidas elétricas a fim de observar se ele apresentava o comportamento característico de um diodo, como também seu comportamento resistivo frente a iluminação.

PALAVRAS-CHAVE: energia solar, células fotovoltaicas, eletrodeposição

ABSTRACT: The world energetic demand has called discussions about the resort of renewable energies, and, thus, fomented researches about the photovoltaic conversion. This research field is concerned with making the energy production costs a little cheaper, and, for this, looks for new technologies for the production of solar cells. One of these technologies has used CuInSe_2 (CIS) thin films as the absorber of photovoltaic cells. Looking towards this field, this work has proposed to study the physical properties of CIS. First, it was done theoretically with DFT calculations, using PBE parameterization, and

the mBJ exchange potential. The calculated density of states and optics for the bulk CIS were compared with XPS experimental measurements for the valence band, and with ellipsometry measurements for the dielectric function. Besides that, this work presents the development of a thin film photovoltaic cell presenting the following structure: SnO₂:F (FTO), In₂Se₃ (IS), CIS. These two last materials were grown by electrodeposition, and characterized with EDS and SEM. The device was characterized by electrical measurements – the aim was to observe if it presented the diode character, as well as observe its behavior when illuminated.

KEYWORDS: solar energy, photovoltaic cells, electrodeposition

1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, o mercado é dominado pelas células solares fabricadas a partir do silício cristalino (Si), que possui a mais alta eficiência de conversão de energia, 24,5% (em laboratório), embora algumas pesquisas apontem que as células que utilizam uma multijunção de filmes finos de GaAs cheguem a atingir eficiência de 41,1% (em laboratório) (Kodigala, 2010). O Si conseguiu atingir projeção na manufatura das células devido ao domínio das técnicas de crescimento desse material, que possibilita o desenvolvimento de amostras sem defeitos. Mesmo com essa projeção, o silício não possui as características desejadas para o seu uso como material absorvedor em uma célula, pois apresenta gap de energia de 1,1 eV, além de coeficiente de absorção razoavelmente baixo. Além disso, a energia fotovoltaica gerada com o Si possui alto custo de produção, com valor médio 110 dólares/MWh (NREL OpenEI, 2015) – dados dos Estados Unidos da América. Por outro lado, algumas características estão a seu favor, pois apresenta estabilidade e confiabilidade na sua performance em ambientes externos.

Dentre os materiais proeminentes na fabricação das células com a tecnologia de filmes finos, podemos apontar o CIS, que é um semiconductor tipo *p*, policristalino, de gap-direto, com energia variando entre 0,96 e 1,2 eV (Kodigala, 2010) (Shah, 1999) (Kang, 2006), e possui coeficiente de absorção alto. Em laboratório, pesquisas apontam que as células solares fabricadas a partir do CIS têm apresentado eficiência de 18,8% (Shah, 1999) (Kang, 2006). Quanto à sua estabilidade, não apresenta problemas de degradação induzida pela luz, muito menos instabilidade quando operando em ambientes quentes e húmidos. Além desses aspectos, é esperado que as células fabricadas com essa tecnologia apresentem custo de fabricação bem menor que aquelas fabricadas a partir do Si, pois envolvem uma quantidade bem pequena de material em sua manufatura (indica-se que a espessura do filme esteja entre 1 e 1,5 μm), apesar do índio ser um elemento que apresenta alto custo.

As características apresentadas para o CIS na manufatura de células solares têm encorajado o aumento das pesquisas de suas propriedades e, nos últimos anos,

diversos trabalhos têm sido publicados, utilizando diversas técnicas de crescimento para o CIS e, dentre elas, a eletrodeposição (Silva, 2010) (Kang, 2006) (Taunier, 2005) (Liu, 2011). Essa técnica é interessante por apresentar baixo custo de aplicação, não necessitar de técnicas de vácuo, ser de fácil, rápida e segura aplicação a grandes áreas, não produzir gases tóxicos, além de gerar pouco descarte e se mostrar apropriada para aplicações industriais (Kang, 2006) (Samantilleke, 2011) (Li, 2012). Sendo assim, optamos por estudar o CIS como camada absorvedora de uma célula solar, utilizando o método de eletrodeposição para o seu crescimento.

2 | ESTUDO TEÓRICO DO CIS

A fim de obter melhor compreensão acerca das propriedades físicas do CIS, optou-se pela realização de cálculos de teórica baseados em primeiros princípios, utilizando o Teorema do Funcional da Densidade (DFT). Tais cálculos foram implementados através do Vienna *Ab initio* Simulation Package (VASP) (Kresse; Hafner, 1993) (Kresse; Hafner, 1994) (Kresse; Furthmuller, 1996a) (Kresse; Furthmuller, 1996a).

2.1 Detalhes Computacionais

O termo de troca e correlação é tratado dentro da Aproximação do Gradiente Generalizado (GGA), com a parametrização Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE). Quanto aos detalhes dos cálculos, foi utilizada a energia de corte de 410 eV para a expansão das funções de onda. As integrações na zona de Brillouin foram realizadas a partir de uma malha de 7x7x5 pontos k , gerados pelo esquema de Monkhorst-Pack. Os pseudopotenciais utilizados apresentavam as seguintes configurações eletrônicas de valência: Cu: $3p^6, 3d^{10}, 4p^1$; In: $4d^{10}, 5s^2 5p^1$; Se: $4s^2, 4p^4$.

Infelizmente, o método PBE apresenta falhas na predição do *gap* de energia de materiais semicondutores. Como essa característica influencia diretamente em as propriedades ópticas do material e, conseqüentemente, possui implicações sobre seu comportamento absorvedor, decidiu-se pela realização de cálculos adicionais que pudessem encontrar um valor mais preciso para o *gap*. Para tal, foi empregado o potencial de troca Tran-Blahá modified Becke-Johnson (mBJ). Os parâmetros $a=0,012$ e $b=1,023 \text{ bohr}^{1/2}$ foram ajustados sistematicamente de modo a obter o melhor valor possível para o *gap* de energia, em relação ao valor medido experimentalmente.

2.2 Estrutura Cristalina

<i>Referência</i>	<i>a (Å)</i>	<i>c (Å)</i>	<i>c/a</i>	<i>u</i>	<i>B₀ (GPa)</i>	<i>B'₀</i>
*(Madelung, 2004)	5,781	11,552	1,998	0,250	-	-
(Belhaldj, 2004)	5,733	11,39	1,988	0,250	53,22	-
(Ghosh, 2015)	5,807	11,62	2,001	0,239	56,62	-
*(Neuman apud Belhaldj, 2004)	-	-	-	-	53,6	-
Este trabalho	5,896	11,78	1,998	0,250	52,71	5,0
Desvio D _%	2%	2%	2%		1,7%	

Tabela 1 – Parâmetros de rede e constantes calculadas (*resultado experimental).

O CIS se apresenta na estrutura cristalina da calcopirita, com uma rede tetragonal descrita pelo grupo espacial $I\bar{4}2d$ (número 122) cujos parâmetros de rede determinados experimentalmente são $a=5,781$ Å; $c=11,552$ Å (Madelung, 2004). Tomando estes valores como ponto de partida, foi realizado o cálculo de otimização dos parâmetros a e c/a , a fim de minimizar a energia do sistema. Os dados gerados ao longo deste procedimento foram ajustados com a equação de estado de Birch-Murnaghan, permitindo a determinação de alguns parâmetros à pressão zero: coeficiente de compressibilidade (B_0) e de sua primeira derivada (B'_0), parâmetros de redes e da energia total (E_0). Essas informações estão postas na tabela 1, na qual se pode observar que os valores determinados aqui para os parâmetros de rede, como também o módulo de compressibilidade, apresentaram desvio relativo menor que 5%, em relação aos valores experimentais. Ainda, a razão c/a e a constante do deslocamento do ânion (u) apresentaram valores próximos aos experimentais, mostrando pequeno desvio em relação aos valores esperados para a estrutura da blenda de zinco: $c/a=2$ e $u=1/4$.

2.3 Densidade de Estados (DOS)

Os resultados dos cálculos para a densidade de estados total no CIS estão apresentados na Figura 1. Nesses gráficos é possível observar a variação da DOS em função do método de cálculo (PBE ou mBJ), os quais foram comparados com uma medida da banda de valência do CIS utilizando a espectroscopia de fotoelétrons-X (XPS). Com isso foi notado que o cálculo com mBJ fez com que os estados do In:d passassem a estar mais localizados, com intensidade maior e posicionados mais próximos dos picos experimentais (16,3 e 17,3 eV). Há, também, com o mBJ,

modificações nos estados que formam o topo da banda de valência, dominados por orbitais Cu:d. Esses estados ficam mais concentrados entre 0 e -3 eV, em conformidade com os resultados experimentais, e com uma hibridização com os orbitais Se:p. Os estados que passam a ficar entre -4 e -5 eV são formados por uma hibridização entre os orbitais In:s e Se:p.

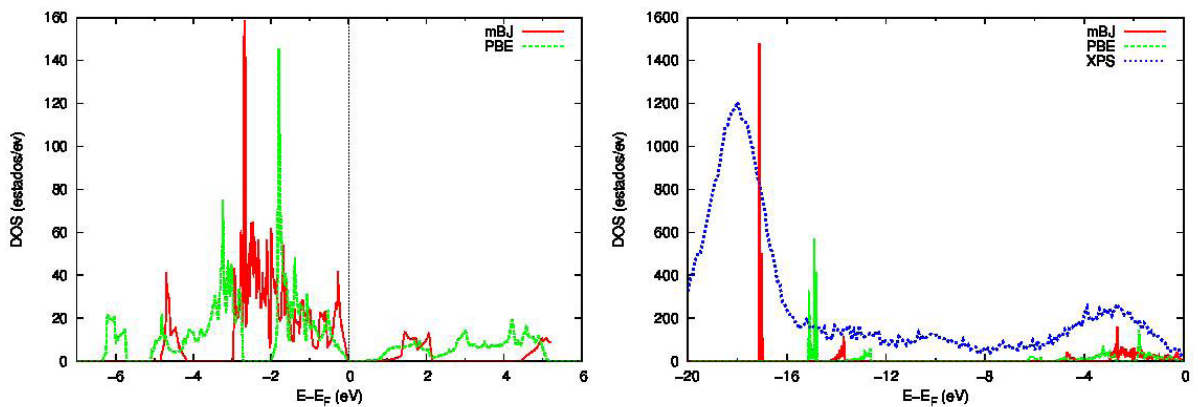


Figura 1 – Densidade de estados: (*esquerda*) comparação entre os métodos de cálculos; (*direita*) banda de valência comparada com medidas experimentais.

Quanto aos estados da banda de condução, os resultados com PBE mostram que os estados superpostos em uma só banda de energia, indo de 0 até 5 eV, passam, com o mBJ, para duas bandas de energia distintas: a primeira até 2 eV, formada por uma hibridização de orbitais In:s e Se:p; a segunda iniciando em 4,5 eV, formada por uma hibridização de orbitais In:p e Se:p. Como esperado, o *gap* de energia, que foi calculado como 46 meV através do PBE, passa ao valor de 520 meV para os cálculos com mBJ. Esses valores e outros da literatura estão presentes à tabela 2.

<i>Referência</i>	LDA	PBE	mBJ	mBJ+U	Experimental
(Madelung, 2004)	-	-	-	-	1,02
(Alonso, 2001)	-	-	-	-	1,04
(Belhaldj, 2004)	0,26	-	-	-	-
(Ghosh, 2015)	-	0,748	1,234	-	-
(Zhang, 2013)	-	-0,29	0,46	0,97	-
Este trabalho	-	0,046	0,520	-	-

Tabela 2 – Valores de *gap* de energia (expressa em eV).

2.4 Óptica

Os resultados para os cálculos da função dielétrica estão apresentados nos gráficos da figura 2, comparados com resultados experimentais obtidos por elipsometria, realizada por Alonso (2001). Uma vez que o *gap* calculado por ambos os métodos ficou abaixo do valor experimental, foi utilizado o método da tesoura, no qual se adicionou 0,994 eV para os resultados do método PBE e 0,52 eV para o mBJ. O intuito dessa operação é transladar as componentes da função dielétrica a fim de obter

uma comparação direta com os resultados experimentais.

Nos resultados obtidos a partir da parametrização PBE é possível observar que ϵ_1 possui uma tendência geral bem próxima ao resultado experimental, assim como os resultados com mBJ. Um aspecto negativo dos resultados com PBE é que eles preveem valores muito altos para ϵ_1 na região de baixas energias, o que não é observado experimentalmente. Por outro lado, o resultado com o mBJ apresenta valores mais próximos da realidade, embora apresente uma diferença acentuada do comportamento de ϵ_1 a partir de 4 eV.

Quanto à parte imaginária da função dielétrica, os resultados com o PBE também apresenta uma tendência bem próxima ao resultado experimental, salvo pelo fato de que a transição presente em 1,5 eV esteja sendo prevista com intensidade maior que os resultados experimentais. Além disso, a transição entre o topo da banda de valência e o fundo da banda de condução também é prevista com intensidade mais alta que a experimental. Novamente, os resultados com o mBJ estão mais próximos dos experimentais, salvo pela diferença acentuada no comportamento de ϵ_2 a partir de 4 eV.

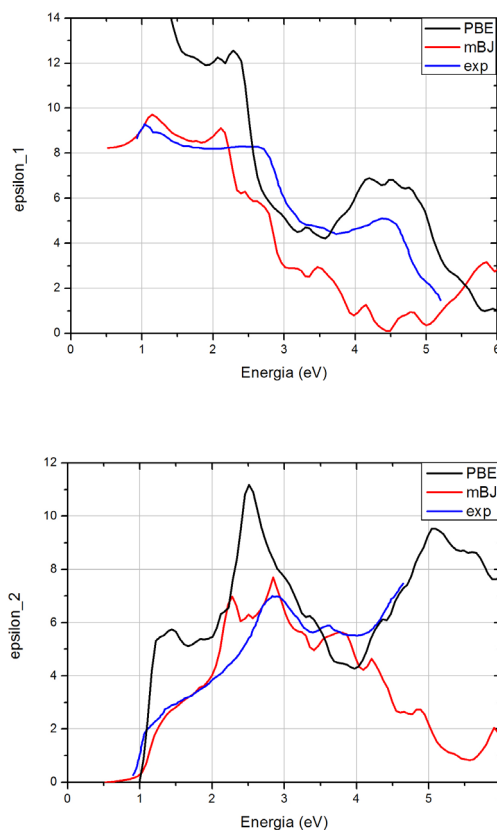


Figura 2 – Função dielétrica do CIS, calculados através do método PBE e mBJ, em comparação com o resultado experimental de Alonso (2001).

3 | FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO

Kodigala (2010) comenta sobre as características que devem guiar a escolha

dos quatro elementos descritos acima, apontando que a camada absorvedora deve possuir energia de *gap* em torno de 1,55 eV, que é o *gap* para o qual se possui a melhor relação de eficiência de conversão. Além disso, o material absorvedor deve possuir *gap* direto e alto coeficiente de absorção. Quanto à escolha da segunda camada, não deve haver muita diferença entre suas características de rede em relação à camada absorvedora – o mesmo deve acontecer para suas características térmicas. Tal cuidado leva a uma redução na criação de uma densidade de estados na interface entre as duas camadas, o que poderia gerar perdas por recombinação dos pares elétron-buraco. Outras observações a serem feitas é que tais materiais devem possuir eletro-afinidades compatíveis, bem como devem formar baixa resistência elétrica no contato. Com isso, evita-se uma diferença muito grande para o potencial na junção. A terceira camada, com tratamento ante-reflexivo, deve funcionar como uma janela ótica e ser um semicondutor tipo *n* com energia de *gap* alta e resistividade baixa. Com essas características, esse material deve apresentar alta transmitância na região do visível, como também deve atuar como um bom eletrodo.

Portanto, propôs-se a montagem de um dispositivo fotovoltaico, que contem a seguinte estrutura: $\text{CuInSe}_2/\text{In}_2\text{Se}_3/\text{SnO}_2:\text{F}$. Neste dispositivo, o CIS desempenha o papel da camada absorvedora, conforme fatores já explanados anteriormente; na segunda camada tem-se o In_2Se_3 (semicondutor tipo *n*), também conhecida como camada “buffer” – pois tem o papel de aumentar a eficiência de conversão da célula solar; o FTO (semicondutor tipo *n*) será o eletrodo/janela ótica, atendendo às necessidades especificadas acima.

Os filmes finos de CIS e In_2Se_3 (IS) foram crescidos por eletrodeposição potencioestática. Essa é uma técnica interessante por apresentar baixo custo, não necessitar de técnicas de vácuo, ser de fácil, rápida e segura aplicação a grandes áreas, não produzir gases tóxicos, além de gerar pouco descarte. Quanto ao $\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO), foi utilizada a técnica de pirólise de spray.

3.1 Eletrodeposição

O crescimento do filme de CIS (e IS) foi realizado através do método de eletrodeposição, para a qual contamos com um potencioestato Autolab. Foi utilizada uma célula eletroquímica de três eletrodos: um eletrodo de trabalho, que será o filme condutor de FTO; um eletrodo de referência (Ag/AgCl); um eletrodo auxiliar de platina. O banho eletrolítico conta com uma solução de suporte aquosa de NaBF_4 a 0,1 mol/L. A solução de depósito é composta por: SeO_2 (a 6,89 mmol/l), $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ (a 3,6 mmol/l) e CuSO_4 (a 3,5 mmol/l) – para a deposição do IS, apenas foi retirada a solução o sulfato de cobre.

Resultados de estudos de voltametria catódica sobre a solução de depósito mostram a existência de um potencial de redução da mistura $\text{CuSO}_4+\text{In}_2(\text{SO}_4)_3+\text{SeO}_2$ localizado em -0,27 V. A presença do eletrodo de FTO inseriu uma ligeira modificação

no perfil do voltamograma da solução, deslocando o potencial de redução para -0,33 V. Com isso, o potencial de trabalho contínuo para a deposição do CIS foi ajustado para -0,55 V (Ag/AgCl) – foi utilizado o potencial de trabalho de -1,0 V (Ag/AgCl) para a deposição do In_2Se_3 .

3.2 Análise Estequiométrica

Para a análise das características das amostras que compõem o dispositivo foram realizadas medidas de espectroscopia por dispersão de energia (EDS). A tabela 3 apresenta as concentrações atômicas para os filmes de CIS e IS após estes passarem pelo processo de tratamento térmico, que visa a melhoria de sua cristalinidade, como também o aumento da homogeneidade da sua superfície. Os resultados mostram concentrações bem próximas aos valores almejados, embora haja, ainda, pequenos desvios estequiométricos que podem contribuir para a formação de cristalitos defeituosos. As espessuras dos filmes componentes do dispositivo foram medidas como 1,9 μm para o CIS; 0,5 μm para o IS; 0,34 μm para o FTO.

<i>Amostra</i>	<i>Concentrações Atômicas (%)</i>		
	Cu	Se	In
CIS (7-1-A)	24,6	46,2	29,2
IS (8-4-B)	-	56,6	43,4

Tabela 3 – Percentuais atômicos (At%) para o CIS e IS.

3.3 Medidas Elétricas na Junção CIS-IS-FTO

Para avaliar o comportamento elétrico da junção, foram realizadas medidas de tensão e corrente $V \times I$, que foram realizadas através do uso de um osciloscópio e um gerador de sinais. A figura 4 apresenta um desses resultados, no qual é claro que o dispositivo se comporta como um diodo, embora ainda sejam encontrados problemas de homogeneidade ao longo de sua superfície. Tais problemas de homogeneidade refletem na resposta $V \times I$ de alguns da superfície do dispositivo, que apresentam uma característica não-linear, mas com certo desvio em relação à resposta de um diodo.

Ainda, foram realizadas medidas da resistência elétrica através do dispositivo. Com essas é possível observar as mudanças da resistência em função da iluminação da amostra, ou seja, mudanças na população de pares elétron-buraco no interior do dispositivo. As medidas foram realizadas por um multímetro com pontas de prova conectadas às extremidades do dispositivo: FTO e o filme de CIS. A iluminação foi efetuada por uma lâmpada halógena tipo H4, 12 V, com 60 W de potência. O resultado dessas medidas está resumido na tabela 4, que apresenta o comportamento resistivo de amostras distintas.

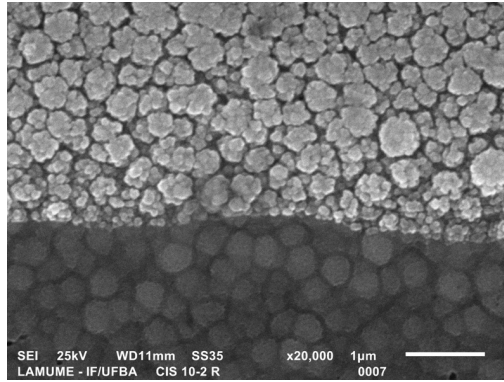


Figura 3 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o dispositivo.

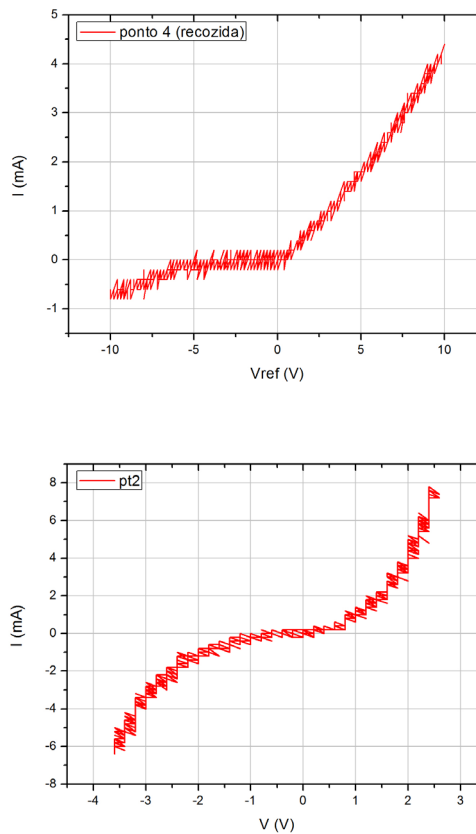


Figura 4 – Medida de tensão e corrente sobre pontos distintos de um mesmo dispositivo.

Do mesmo modo que aconteceu com a resistência, as medidas de $V \times I$, as medidas de resistência através do dispositivo também variaram em função dos diferentes pontos da superfície, corroborando com a hipótese de problemas de homogeneidade no dispositivo. Mesmo assim, as medidas presentes à tabela 4 mostram uma queda na resistividade, em função da iluminação, que vão de 0,6 a 3,5 KW. A fim de mensurar a magnitude nessa variação na resistência, também foram realizadas medidas sobre uma amostra composta apenas de um filme de CIS sobre o FTO – essa mostrou uma variação de apenas 0,046 KW com a iluminação.

Amostra	Composição	Iluminação	R (KΩ)
10-2-BA	FTO+IS+CIS	Não	13,3
		Sim	9,8
18-1-BA	FTO+IS+CIS	Não	5,4
		Sim	4,8
18-3-BA	FTO+IS+CIS	Não	8,1
		Sim	7,0
7-1-A	FTO+CIS	Não	0,424
		Sim	0,378

Tabela 4 – Medidas de resistência através do dispositivo com/sem iluminação.

4 | DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Os resultados experimentais ainda não apresentam uma medida da eficiência quântica do dispositivo, ou mesmo da tensão gerada por ele. Isso é justificado simplesmente pelo fato de que os estudos ainda estão na fase de aprimoramento do dispositivo fotovoltaico, que tenta resolver os problemas de homogeneidade no seu comportamento elétrico. Tais problemas podem estar associados à existência de pequenos curtos circuitos entre os filmes de CIS e FTO, com possíveis causas no processo de crescimento dos filmes, ou mesmo por possíveis falhas no filme de IS. Os resultados das medidas elétricas indicam, também, que o uso do IS como “buffer” influencia positivamente no comportamento do dispositivo, uma vez que apenas a junção dos filmes de FTO (semicondutor tipo n) e CIS (semicondutor tipo p) não mostrou variações significativas em sua resistência quando iluminados (tabela 4), apesar de medidas V_x demonstrarem um comportamento não linear.

Os resultados teóricos para a densidade de estados mostram a evolução da localização dos orbitais eletrônicos de valência, a partir dos quais se pode concluir que o uso do potencial mBJ realmente melhora a previsão do *gap* de energia, que é consequência de um melhor posicionamento dos orbitais, como foi observado na figura 1. Outra consequência do posicionamento mais acertado dos orbitais eletrônicos é o resultado obtido para a função dielétrica. Nesse caso, os cálculos com mBJ melhoram a previsão da constante ϵ_0 , como também trazem valores para ϵ_1 e ϵ_2 mais próximos dos resultados experimentais apresentados por Alonso (2001).

Como perspectiva para os resultados teóricos, é previsto o uso de outros funcionais e potenciais a fim de melhorar a previsão da localização dos orbitais eletrônicos, que, como consequência, deve melhorar a previsão do *gap* e da óptica. Com isso, se terá maior clareza quanto às transições ópticas que ocorrem na faixa de energias de interesse para a absorção e funcionamento do dispositivo fotovoltaico (espectro de radiação eletromagnética entre o visível e o infravermelho próximo), permitindo melhor descrição do funcionamento do dispositivo. Outra perspectiva é passar a realizar cálculos teóricos com o IS.

Por fim, os resultados apresentados aqui mostram que houve sucesso no desenvolvimento de uma célula fotovoltaica baseada em filmes finos de IS e CIS, que

apresentou comportamento elétrico similar ao de um diodo, como também apresentou resistividade sensível a iluminação. As perspectivas para os resultados experimentais são de aprimorar o dispositivo e medir a sua eficiência quântica.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, M. I. et al., 2001. *Optical functions and electronic structure of CuInSe_2 , CuGaSe_2 , CuInS_2 , and CuGaS_2* . **Physical Review B**, 63: pp. 0752031-07520313.
- BELHALDJ, M. et al., 2004. *Structural, electronic and optical calculations of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ternary chalcopyrites*. **Physica Status Solidi**, 241: pp. 2516-2528.
- GHOSH, A. et al., 2015. *Electronic and optical modeling of solar cell compound CuXY_2 ($X=\text{In, Ga, Al}$; $Y=\text{S, Se, Te}$): first-principles study via Tran-Blaha modified Becke-Johnson exchange potential approach*. **Journal of Material Science**, 50: pp. 1710-1717.
- KANG, S. H. et al. *Characterization of electrodeposited CuInSe_2 (CIS) film*. **Electrochimica Acta**, vol. 51, 2006 (4433-4438).
- KODIGALA, S. R. **Thin Films and Nanostructures: $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ based thin film solar cells**. Academic Press: Burlington, 2010.
- KRESSE, G.; HAFNER, J. *Ab initio molecular dynamics for liquid metals*. **Physical Review B**, v. 47, p. 558, 1993.
- KRESSE, G.; HAFNER, J. *Ab initio molecular-dynamics simulation of the liquid-metal-amorphous-semiconductor transition in germanium*. **Physical Review B**, v. 49, p. 14251, 1994.
- KRESSE, G.; FURTHMULLER, J. *Efficiency of ab-initio total energy calculations for metals and semiconductors using a plane-wave basis set*. **Computational Materials Science**, v. 6, p. 15-50, 1996.
- KRESSE, G.; FURTHMULLER, J. *Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set*. **Physical Review B**, v. 54, p. 11169, 1996.
- LI, Y. et al., 2012 *Film growth mechanism for electrodeposited copper indium selenide compounds*. **Thin Solid Films**, vol. 524, (20-25).
- LIU, F. et al. *Preparation of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ thin films by pulse electrodeposition*. **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 509, 2011 (L129-L133).
- MADELUNG, O., 2004. **Semiconductors: Data Handbook**. Springer.
- NREL OpenEI Transparent Cost Database (<http://en.openei.org/apps/TCDB/>). Accessed 27/11/2015.
- SAMANTILLEKE, A. P. et al. *Flexible CuInSe_2 photovoltaic cells fabricated by non-vacuum techniques*. **Thin Solid Films**, vol. 519, 2011 (7272-7275).
- SHAH, A. et al. *Photovoltaic technology: the case for thin-film solar cells*. **Science**, vol. 285, 1999 (629-698).
- TAUNIER, S. et al. *$\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ solar cells and modules by electrodeposition*. **Thin Solid Films**, vols. 480-481, 2005 (526-531).
- ZHANG, Y. et al., 2013. *Near-edge band structures and band gaps of Cu-based semiconductors*

predicted by the modified Becke-Johnson potential plus an on-site Coulomb U. The Journal of Chemical Physics, 139: pp. 184706.

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 978-85-7247-067-4



9 788572 470674