



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

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

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas)/Pós-Graduação Engenharia Mecânica/Grupo de Estudos em Energia (GREEN-IPUC)

Belo Horizonte – Minas Gerais

RESUMO: Neste trabalho, os conceitos de energia e exergia são usados para estimar e comparar os desempenhos de módulos fotovoltaicos de silício monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si). A eficiência energética é a relação entre a potência de saída do módulo e o produto da radiação solar e da área de incidência (área do módulo). A eficiência exergética é derivada dos parâmetros elétricos, da temperatura de operação dos módulos e das condições específicas do clima. Os parâmetros elétricos dos módulos foram estimados através do ajuste das especificações do módulo (*datasheet*) às variáveis climáticas obtidas para a cidade de Belo Horizonte, Brasil. Para isso, a radiação solar incidente sobre o módulo fotovoltaico inclinado, a temperatura ambiente e a temperatura de operação do fotovoltaico foram estimadas. O módulo de

silício monocristalino (190W) apresentou eficiências energética e exergética em torno de 20% e 14%, respectivamente. Em comparação, o módulo de silício policristalino (210W) indicou uma eficiência energética menor de aproximadamente 18% e uma eficiência exergética de cerca de 13%, resultados estes já esperados, devido a diferença de pureza do silício para as duas tecnologias analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: Módulos Fotovoltaicos, Desempenho, Eficiência Energética, Eficiência Exergética.

ABSTRACT: In this work the concepts of energy and exergy are used to estimate and compare the performances of monocrystalline (m-Si) and polycrystalline silicon modules. The energetic efficiency is the ratio of the power output of module to the product of solar radiation and the area of incidence or area of the module. The exergetic efficiency is derived from the electrical parameters, the operating temperature of the modules, and the specific weather conditions. The electrical parameters of the modules were estimated by adjusting module (nameplate) specifications to the climate variables obtained for the city of Belo Horizonte, Brazil. The monocrystalline silicon module (190W) presented energetic and exergetic efficiencies around 20% and 14%, respectively. In comparison, the polycrystalline

silicon module (210W) has an expected lower energetic efficiency was approximately 18% and exergetic efficiency, of about 13%.

KEYWORDS: Photovoltaic modules, Performance, Energetic efficiency, Exergetic efficiency.

1 | INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica e a hipótese de esgotamento de combustíveis fósseis são alguns dos fatores preponderantes para alavancar pesquisas e incentivos referentes à utilização de fontes renováveis. De acordo com Dincer et al. (2010) o declínio do fornecimento de energia fóssil do mundo associado ao aumento do consumo de energia e a tendência contínua de aquecimento global causado pelas emissões de gases de efeito estufa, têm motivado os esforços de inovação e pesquisa para a implementação de uma economia global baseada em energia renovável. Este tipo de energia vem de três fontes „fundamentais“, ou seja, solar, gravitação combinado com o movimento do planeta, e geotérmica. A energia solar pode ser utilizada para diversos fins, entre os quais a geração de energia elétrica, pois oferece a possibilidade de fornecer uma parte cada vez mais importante da demanda mundial de energia.

A maioria dos sistemas de conversão de energia, especialmente, as usinas de geração de energia elétrica, não operam em condições nominais ao longo da sua vida útil, mudanças semi-periódicas, periódicas e estocásticas na disponibilidade do recurso afetam o desempenho dos sistemas que utilizam energias renováveis, fazendo com que estes funcionem em condições *off-project* a maior parte de sua vida útil. Uma forma de amenizar os impactos das mudanças na disponibilidade dos recursos é a utilização de um ano meteorológico típico que represente o comportamento das variáveis meteorológicas ao longo de um determinado período de dados, sendo de crucial importância para o setor energético. O ano padrão é um conjunto de dados experimentais que tem como função representar um ano típico para uma determinada localidade, tornando-se representativo para diversos outros anos. O ano meteorológico típico ou ano padrão permite aplicar o conhecimento da meteorologia local nos procedimentos para avaliação, projeto, planejamento e operação de plantas de geração a partir de fontes renováveis.

Os sistemas fotovoltaicos estão entre os sistemas de conversão de energia que são influenciados por condições adversas, capazes de afetar o desempenho destes. Os principais fatores que contribuem para a não operação em condições nominais em sistemas fotovoltaicos são as variáveis meteorológicas, como a temperatura ambiente e a radiação solar, que afetam consideravelmente o funcionamento dos módulos fotovoltaicos. Os módulos fotovoltaicos são os responsáveis por converter a radiação solar que incide sobre estes em energia elétrica. A avaliação do desempenho de módulos fotovoltaicos pode ser realizada através da aplicação da Primeira e da

Segunda Lei da Termodinâmica, denominada eficiência energética e exergética, respectivamente. De acordo com Dincer (2002) a análise exergética é uma ferramenta que permite a avaliação do impacto ambiental da utilização do recurso energético. A técnica de análise exergética possui aplicação na previsão dos objetivos de uso de fontes de energia mais eficientes, permitindo a determinação de localizações, tipos, e magnitudes reais de perdas e gastos. Pode ainda ser uma ferramenta de grande valia no estudo da possibilidade de redução da ineficiência em sistemas já existentes. Associadas a todas estas funcionalidades, a análise exergética constitui um componente chave na obtenção de um desenvolvimento sustentável. Segundo Sarhaddi et al. (2010), a eficiência energética de módulos fotovoltaicos é a razão entre a energia gerada e a radiação solar, desprezando a influência direta de alguns fatores, como as propriedades térmicas. Já a exergia considera parâmetros climáticos, geométricos e de operação dos módulos, incluindo as propriedades térmicas, fornecendo resultados mais realistas do processo de conversão de energia por módulos fotovoltaicos. Joshi et al. (2009) citam que a energia de um sistema fotovoltaico depende principalmente de duas componentes denominadas energia elétrica e energia térmica. A energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico é também denominada como a exergia elétrica, uma vez que ela está completamente disponível para ser convertida em trabalho. Uma vez que a energia térmica disponível na superfície das células fotovoltaicas não pode ser utilizada para gerar trabalho útil no caso dos sistemas fotovoltaicos, ela passa a constituir perda de calor para o ambiente. A eficiência energética de um sistema fotovoltaico pode ser definida então como uma relação entre a energia elétrica gerada e a energia solar total incidente na superfície da célula fotovoltaica. Para Pandey et al. (2013) a análise energética é mais apropriada quando uma análise global é necessária, já a análise exergética é mais apropriada quando o sistema ou um componente individual devem ser analisados qualitativamente.

Dentre os trabalhos realizados envolvendo análise exergética em módulos fotovoltaicos, destacam-se os trabalhos de Sahin et al. (2007) que investigaram as características termodinâmicas das células fotovoltaicas, com base nas eficiências energéticas e exergéticas. Os resultados indicaram que a eficiência energética variou entre 7 e 12 % durante a hora do dia, enquanto que a eficiência exergética variou entre 2 e 8 %. De acordo com Xydis (2013) as perdas de exergia, estão relacionadas ao fator de correção da temperatura, devido ao aumento da temperatura do módulo, representando perdas de 1,3% no desempenho do sistema. O desempenho de um módulo fotovoltaico depende de variáveis como a temperatura ambiente, radiação solar, ângulo de incidência, acúmulo de sujidades e o tipo de célula fotovoltaica utilizada. A temperatura exerce uma importante influência na eficiência dos módulos e conseqüentemente de todo o gerador fotovoltaico. Colombo et al. (2014) apresentaram uma análise termoeconômica geral para avaliar os efeitos econômicos e ambientais do sistema de integração energética, tendo em conta as preocupações com o ciclo de vida e o efeito das ineficiências devido a operação off-design dos sistemas. O

método é aplicado a um estudo de caso real entre uma usina de energia fotovoltaica e uma usina de energia padrão comercial à turbina a gás (sem cogeração) sobre o custo final do kWh. A avaliação do custo econômico foi realizada por meio de técnicas termoeconômicas, enquanto os custos de exergia são avaliados utilizando os métodos *Extended Exergy Accounting* (EEA) e *Thermo-Ecological Cost* (TEC). Os resultados mostraram que uma avaliação puramente monetária pode levar a resultados contrastantes, e que os indicadores de custos EEA e TEC podem gerar rankings diferentes entre as alternativas estudadas.

Muitos estudos referentes à avaliação do desempenho utilizando a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica foram aplicados em sistemas fotovoltaicos/térmicos (PV/T), em que um único sistema gera energia elétrica e térmica. Ceylan e Gürel (2015) avaliaram experimentalmente um novo sistema de design PV/T para o arrefecimento dos módulos fotovoltaicos, ao mesmo tempo em que se aquecia água. O sistema PV/T é um sistema de circulação forçada sem bomba. A análise exérgica dos sistemas PV/T foram contabilizadas para a exergia térmica do módulo PV e do coletor solar, assim como as variações da exergia elétrica. Os autores concluíram que para a temperatura de 45°C a eficiência exérgica obtida foi de cerca de 17%, enquanto que para a temperatura de 55°C a eficiência exérgica apresentada foi de 21%. Yazdanpanahiet al. (2015) investigaram a eficiência exérgica de um PV/T experimentalmente e numericamente. Através da montagem experimental os seus parâmetros de funcionamento foram obtidos, e também medidos dados da intensidade da radiação solar, velocidade do vento, temperatura ambiente, temperatura de células fotovoltaicas, a entrada de fluido e a temperatura de saída do fluido, tensão circuito aberto, curto-circuito, a tensão máxima potência e a corrente de máxima potência. A simulação numérica utilizou um modelo tridimensional com carga térmica constante e quatro parâmetros modelos corrente-tensão. Equações modificadas foram introduzidas para obter a eficiência exérgica e as perdas de exergia nos componentes do sistema PV/T. Os resultados da simulação numérica se mostraram de acordo com as medições experimentais. A comparação entre a eficiência exérgica modificada utilizada no estudo e aquela proveniente da literatura mostraram que a eficiência exérgica modificada obtido neste trabalho não tem as deficiências da eficiência exérgica proveniente da literatura, sendo capaz de indicar as perdas de exergia no sistema PV/T diretamente.

Considerando o cenário atual caracterizado pelo aumento da instalação de sistemas fotovoltaicos, o que indica uma maior participação desses sistemas de conversão de energia na matriz elétrica mundial, vem incentivando pesquisas relacionadas ao desempenho das tecnologias de módulos. A Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica possibilitam avaliar as eficiências de diversas tecnologias de módulos fotovoltaicos, porém essa metodologia ainda não é largamente utilizada nesses equipamentos, aplicando normalmente em tecnologias PV/T. Esse trabalho tem o objetivo de analisar o desempenho de módulos fotovoltaicos de tecnologias:

silício monocristalino (m-Si) e de silício policristalino (p-Si), aplicando os conceitos da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica através da estimativa das eficiências energéticas e exergéticas, e da influência das variáveis meteorológicas previstas em modelos matemáticos de Duffie e Beckman (2006) e Lorenzo (1994) para a cidade de Belo Horizonte, Brasil.

2 | METODOLOGIA

Os módulos fotovoltaicos são compostos por várias células solares ligadas em série e/ou em paralelo que transformam a energia solar em eletricidade a partir do efeito fotovoltaico. Atualmente existem vários tipos de células constituídas por diferentes materiais, porém a mais utilizada é a de silício por apresentar maior relação eficiência/custo sobre as outras tecnologias de células. As células de silício podem ser de silício cristalino – monocristalino e policristalino – ou de filme fino – silício amorfo. Os módulos fotovoltaicos podem ser distinguidos de acordo com o grau de pureza do semicondutor, sendo que quanto maior a pureza, maior será a eficiência do módulo. Segundo Green e outros (2015), os módulos de silício monocristalino podem atingir eficiências de até 22,9%, devido ao elevado grau de pureza do silício, possibilitando alcançar um maior desempenho em relação às outras tecnologias de células. Os módulos de silício policristalino possuem eficiências em torno de 18,5%, enquanto as células de silício amorfo de filme fino podem chegar a eficiências de aproximadamente 12,2%.

Este trabalho visa analisar o desempenho de duas tecnologias de módulos fotovoltaicos, através da modelagem e simulação das eficiências energética e exergética, considerando dados meteorológicos horários estimados utilizando os modelos de Duffie e Beckman (2006) e Lorenzo (1994). A estimativa das condições meteorológicas foi feita para a cidade de Belo Horizonte que está localizada geograficamente a uma latitude de 19,93° S e longitude de 43,93° S. No modelo foi considerada a inclinação dos módulos fotovoltaicos igual a 20°, o índice de refletividade do solo para área urbana (de 18% , os índices de transparência atmosférica médio mensal () conforme indicados na Tabela 1. Também foram utilizados dados de temperatura mínima e máxima diária e da velocidade do vento para a localidade, disponibilizados pelo projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA). A estimativa das condições meteorológicas para Belo Horizonte foram comparadas e validadas com dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e com o ano padrão obtido do SWERA.

Mês	$\overline{K_T}$	Mês	$\overline{K_T}$	Mês	$\overline{K_T}$
Janeiro	0,46	Maio	0,55	Setembro	0,48
Fevereiro	0,45	Junho	0,60	Outubro	0,50
Março	0,64	Julho	0,64	Novembro	0,45

Abril	0,53	Agosto	0,53	Dezembro	0,41
--------------	------	---------------	------	-----------------	------

Tabela 1: Índice de claridade atmosférica média mensal
Guimarães (1995)

As eficiências energéticas e exergéticas foram estimadas para todas as horas e dias do ano, considerando a variação dos parâmetros meteorológicos e dos parâmetros dos módulos fotovoltaicos. As simulações foram realizadas no software Engineering Equation Solver (EES), no qual foram gerados os gráficos utilizados na análise.

Para estimar os parâmetros elétricos e térmicos dos módulos fotovoltaicos para diferentes condições de operação foi necessário definir os parâmetros em condição de referência, possibilitando estimar a variação destes em relação à temperatura ambiente e a radiação solar. Para isso, foram considerados na simulação como parâmetros de referência, os dados em condição padrão de teste (Standard Test Conditions – STC) dos módulos fotovoltaicos, monocristalino de 190 Wp modelo HG190, e policristalino de 210 Wp modelo HG210, fornecidos pelo fabricante SolarTerra. Na Tabela 2 são apresentadas as características elétricas dos módulos fotovoltaicos monocristalino (HG190) e policristalino (HG210).

	HG190	HG210
Tecnologia	Monocristalino	Policristalino
Potência	190 W	210 W
Tensão de Circuito Aberto ($V_{oc.ref}$)	21,68 V	33,05 V
Corrente de Curto-Circuito ($I_{sc.ref}$)	11,80 A	8,23 A
Tensão no Ponto de Máxima Potência ($V_{m.ref}$)	18,07 V	27,54 V
Corrente no Ponto de Máxima Potência ($I_{m.ref}$)	10,52 A	7,64 A
Coefficiente de Temperatura para Corrente de Curto-Circuito (α)	0,05%/°C	0,05%/°C
Coefficiente de Temperatura para Tensão de Circuito Aberto (β)	-0,38%/°C	-0,38%/°C
Temperatura Nominal de Operação do Fotovoltaico (NOCT)	47 °C	47 °C
Temperatura em Condições Padrão de Teste (STC)	25 °C	25 °C
Largura do Módulo	1,580 m	1,480 m
Comprimento do Módulo	0,808 m	0,990 m

Tabela 2: Características elétricas e térmicas dos módulos fotovoltaicos
SolarTerra (2015)

3 | MODELO METAMÁTICO

O gerador fotovoltaico é constituído por um conjunto de módulos fotovoltaicos, cujo desempenho pode ser influenciado pelas condições meteorológicas, como

a intensidade da radiação solar, a temperatura ambiente e a velocidade do vento. A avaliação do desempenho pode ser realizada aplicando a Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, na estimativa das eficiências energéticas e exergéticas, respectivamente. A eficiência energética é dada por (PANDEY ET AL, 2013):

$$\eta_{\text{energética}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc}}{G_T \cdot A} \quad (\text{eq. 1})$$

onde A é a área do módulo fotovoltaico, G_T é a radiação solar, V_{oc} é a tensão de circuito aberto e I_{sc} é a corrente de curto-circuito. A tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito podem ser estimados através do modelo proposto por Chouder et al. (2012):

$$V_{oc} = V_{oc,ref} - \beta(T_{c,ref} - T_c) + A_f \ln\left(\frac{G_T}{G_{ref}}\right) \quad (\text{eq. 2})$$

$$I_{sc} = I_{sc,ref} \left(\frac{G_T}{G_{ref}}\right) + \alpha(T_c - T_{c,ref}) \quad (\text{eq. 3})$$

onde V_{oc} é a tensão de circuito aberto, G_T é a radiação solar, T_c é a temperatura do módulo. As variáveis com subscritos r e f indicam os parâmetros em condição de referência. Os parâmetros de referência utilizados nesta modelagem foram retirados dos datasheet disponibilizados pelo fabricante dos módulos fotovoltaicos avaliados, considerando a condição padrão de teste (*Standard Test Conditions* –STC). No caso da radiação solar foi utilizado nesse modelo o valor de referência igual a 1000 W/m^2 . O β e α são os coeficientes de temperatura para a tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito, respectivamente. O A_f é o fator de idealidade modificado do diodo, definido por (CHOUDER ET AL., 2012):

$$A_f = \frac{n\sigma T_c}{q} \quad (\text{eq. 4})$$

onde n é o fator de idealidade do diodo, neste trabalho foi considerado o fator de idealidade de um diodo ideal ($n=1$), σ é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), e q é a carga de um elétron ($1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$).

A temperatura do módulo (T_c) pode ser definida a partir dos dados definidos para a condição de operação nominal do módulo, como proposto por Pandey et al. (2013):

$$T_c = T_a + \left(\frac{\text{NOCT} - 20 \text{ }^\circ\text{C}}{800 \text{ W/m}^2}\right) G_T \quad (\text{eq. 5})$$

onde NOCT é a temperatura de operação nominal do módulo e T_a é a temperatura ambiente. A temperatura ambiente (T_a) foi estimada segundo modelo proposto por Lorenzo (1994), que depende do ângulo horário (ω) relativo ao deslocamento do sol a partir do meio dia, contabilizando um deslocamento de 15° a cada uma hora, e pelo ângulo do pôr-do-sol (ω_s) quando finaliza o período de brilho solar (DUFFIE E

BECKMAN, 2006):

Para $-\pi < \omega < \omega_s$, T_a é calculado por:

$$= T_{aM}(i-1) - \frac{T_{aM}(i-1) - T_{am}(i)}{2} \left[1 + \cos \left(\left(\frac{\pi}{\left(\frac{\pi}{6} - \omega_s - 2\pi \right)} \omega \right) + \left(-\frac{\pi}{\left(\frac{\pi}{6} - \omega_s - 2\pi \right)} \omega_s \right) \right) \right] \quad (\text{eq. 6})$$

Na Eq. (2), T_{aM} e T_{am} são a temperatura ambiente máxima e mínima ao longo de um dia, respectivamente, e i é o dia do ano.

Para $\omega_s < \omega < \frac{\pi}{6}$, T_a é calculado por:

$$T_a = T_{am}(i) + \frac{T_{aM}(i) - T_{am}(i)}{2} * \left[1 + \cos \left(\left(\frac{\pi}{\left(\omega_s - \frac{\pi}{6} \right)} \omega \right) + \left(-\frac{\pi}{\left(\omega_s - \frac{\pi}{6} \right)} \frac{\pi}{6} \right) \right) \right] \quad (\text{eq. 7})$$

E para $\frac{\pi}{6} < \omega < \pi$, T_a é calculado por:

$$T_a = T_{aM}(i) - \frac{T_{aM}(i) - T_{am}(i+1)}{2} \left[1 + \cos \left(\left(\frac{\pi}{\left(2\pi + \omega_s - \frac{\pi}{6} \right)} \omega \right) + \left(-\left(\pi + \frac{\pi}{\left(2\pi + \omega_s - \frac{\pi}{6} \right)} \pi \right) \right) \right) \right] \quad (\text{eq. 8})$$

Para estimar a radiação solar incidente sobre o módulo fotovoltaico inclinado (G_T), foi utilizado o modelo de céu isotrópico indicado por Duffie e Beckman (2006), que considera o somatório das componentes direta, difusa isotrópica, e radiação solar difusa refletida pelo solo:

$$G_T = G_b R_b + G_d \frac{(1 + \cos \beta_{in})}{2} + G \rho \frac{(1 - \cos \beta_{in})}{2} \quad (\text{eq. 9})$$

Na Eq. (9), G_b e G_d são a radiação solar direta e difusa, respectivamente; G é a radiação solar total incidente sobre um plano horizontal; R_b é a razão entre a radiação total incidente sobre uma superfície inclinada e uma superfície horizontal; ρ é a refletividade do solo e β_{in} é o ângulo de inclinação do módulo.

A eficiência exergética de módulos fotovoltaicos é dada pela razão entre a exergia de saída e a exergia de entrada.

$$\varepsilon = \frac{\text{Exergia de saída}}{\text{Exergia de entrada}} = \frac{Ex_{elet} - Ex_{therm}}{Ex_{solar}} \quad (\text{eq. 10})$$

onde Ex_{elet} é a exergia elétrica, Ex_{therm} é a exergia térmica e Ex_{solar} é a exergia solar.

A exergia de entrada é proveniente da radiação solar:

$$Ex_{solar} = \left(1 - \frac{T_a}{T_{sol}} \right) G_T * A \quad (\text{eq. 11})$$

A exergia de saída do módulo fotovoltaico é a diferença entre a exergia elétrica e a exergia térmica, definidas por Pandey et al. (2013):

$$Ex_{elet} = V_{oc}I_{sc} - (V_{oc}I_{sc} - V_m I_m) \quad (\text{eq. 12})$$

$$Ex_{term} = \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) U * A(T_c - T_a) \quad (\text{eq. 13})$$

onde V_m e I_m são a tensão e corrente no ponto de máxima potência definidos por (CHOUDER ET AL., 2012):

$$I_m = I_{m,ref} \left(\frac{G_T}{G_{ref}}\right) \quad (\text{eq. 14})$$

$$V_m = V_{m,ref} - \beta(T_{c,ref} - T_c) \quad (\text{eq. 15})$$

Nas Eq. (14) e (15), $I_{m,ref}$ e $V_{m,ref}$ são a tensão e corrente no ponto de potência máxima para uma condição de referência. Na Eq. (12), a variável U representa o coeficiente de transferência de calor:

$$U = 5.7 + 3.8 * v \quad (\text{eq. 16})$$

onde v é a velocidade do vento. Dessa forma, a eficiência exergética é dada pela razão entre a diferença da exergia elétrica e térmica pela exergia solar. A exergia térmica é subtraída da exergia elétrica, pois o calor gerado no processo de conversão da radiação solar em energia elétrica é rejeitado, não sendo utilizado como produto útil:

$$\varepsilon = \frac{\text{Exergia de saída}}{\text{Exergia de entrada}} = \frac{V_m I_m - \left(1 - \frac{T_a}{T_c}\right) U * A(T_c - T_a)}{\left(1 - \frac{T_a}{T_{sol}}\right) G_T * A} \quad (\text{eq. 17})$$

4 | RESULTADOS

As médias mensais estimadas para a radiação solar incidente sobre uma superfície horizontal foram comparadas com dados médios mensais experimentais referentes aos anos de 2011 a 2013 para a cidade de Belo Horizonte/Brasil, disponibilizados pelo INMET, conforme mostrado na Figura 1.

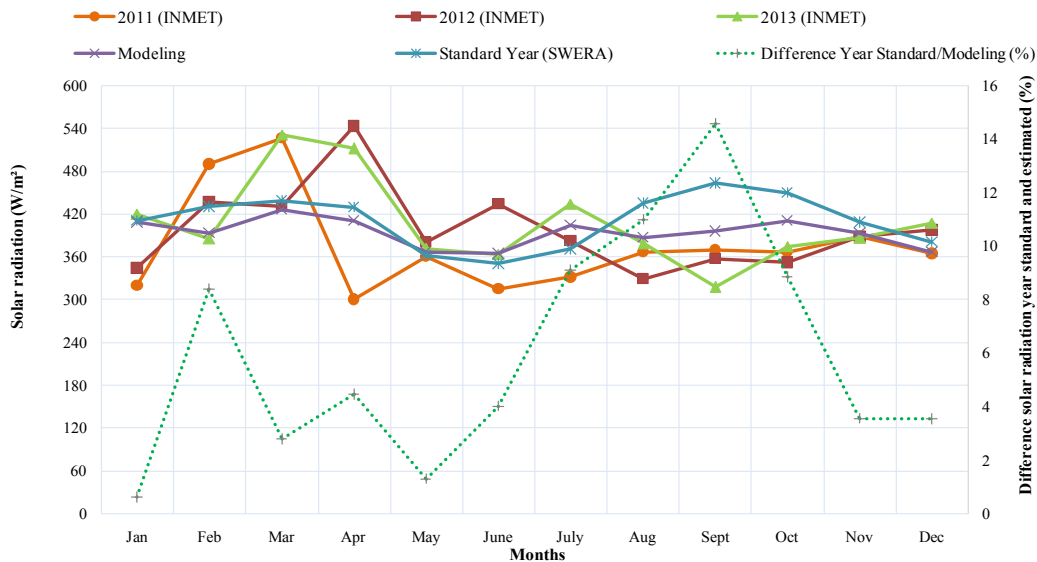


Figura 1: Comparação entre as médias mensais da radiação solar para Belo Horizonte, Brasil

Quando comparados os valores de radiação solar estimados pelo modelo com os valores do ano padrão, pode-se perceber diferenças de até 15%; no entanto, o comportamento global e a média anual são bastante próximos. O ano padrão representa um ano típico para uma determinada localidade, podendo ocorrer variações reais significativas de um ano para outro, como observado nas curvas experimentais obtidas para os anos de 2011, 2012 e 2013.

A temperatura ambiente obtida pelo modelo é mostrada na Figura 2, em comparação com a modelada através do ano padrão e os valores experimentais para os anos de 2011 a 2013. Pode ser notado que os valores experimentais variaram significativamente entre os anos analisados. Quando comparados os valores obtidos pelo modelo de Lorenzo (1994) e pelo ano padrão, percebe-se que os valores são bem próximos, com diferenças máximas inferiores a 3%.

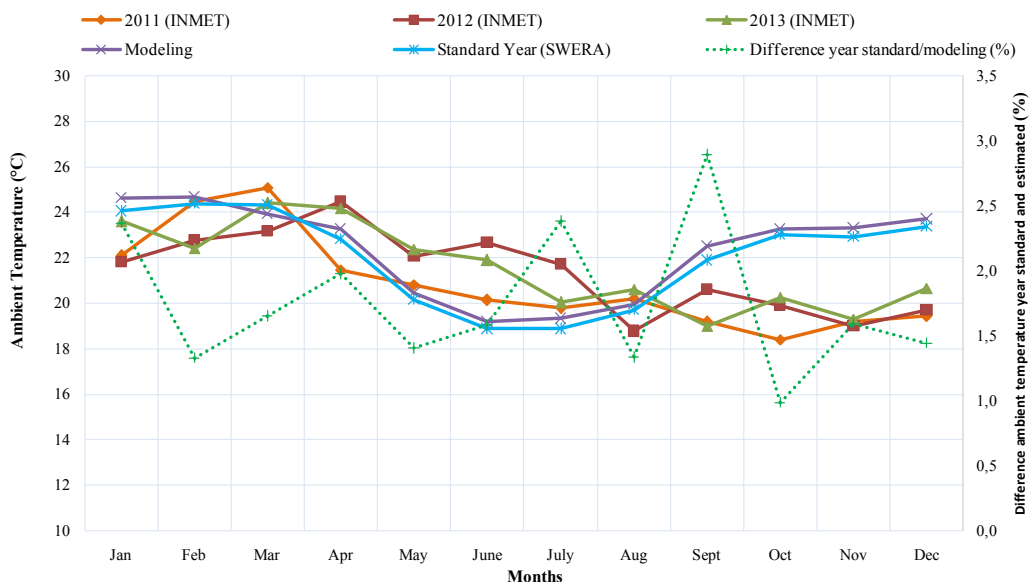


Figura 2: Comparação entre as médias mensais da temperatura ambiente para Belo Horizonte, Brasil

Após a comparação dos dados obtidos pelo presente modelo com dados experimentais e com dados obtidos pelo ano padrão, conclui-se que os resultados podem ser utilizados para estimar o comportamento da radiação solar incidente e da temperatura ambiente para a cidade de Belo Horizonte, Brasil. Assim, estes resultados foram usados como dados de entrada para se estimar a radiação solar incidente sobre os módulos fotovoltaicos inclinados (20°) e as eficiências energética e exérgica.

A Figura 3 apresenta os valores médios mensais da temperatura ambiente e da radiação solar incidente sobre o plano dos módulos fotovoltaicos inclinados para a cidade de Belo Horizonte, Brasil. Pode ser observado que os meses correspondentes ao inverno no hemisfério sul (junho, julho e agosto) apresentam os menores índices de temperatura médias mensais, como já esperado. Já os meses correspondentes ao verão no hemisfério sul (dezembro, janeiro, fevereiro e março) apresentam temperaturas mais elevadas e menores índices de radiação solar. Este comportamento pode ser atribuído tanto aos maiores índices de transparência atmosférica atingidos no inverno e à inclinação dos módulos em 20° . Duffie e Bekman (2006) afirmam que, para maximizar a incidência de radiação solar no inverno, os equipamentos solares devem possuir inclinação igual ao módulo da latitude local.

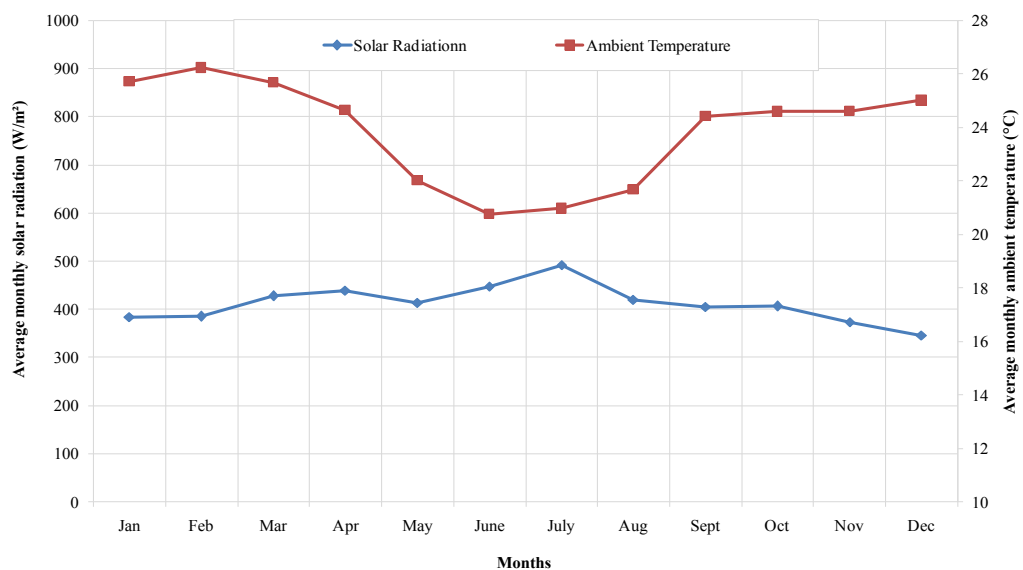


Figura 3: Médias mensais das condições meteorológicas para Belo Horizonte, Brasil

A Figura 4 mostra as taxas de exergia dos módulos fotovoltaicos HG190 (monocristalino) e HG210 (policristalino). A exergia devido à radiação solar representa o máximo trabalho útil que pode ser aproveitado pelo módulo fotovoltaico. Quando comparados os valores obtidos para os módulos HG190 e HG210, para uma determinada data, percebe-se que o HG210 apresenta maiores taxas. A exergia devido à radiação solar depende dos parâmetros ambientais (temperatura ambiente, temperatura do sol e

radiação solar) e da área do módulo. Como os parâmetros ambientais são os mesmos para os dois módulos, os maiores valores obtidos pelo HG210 podem ser atribuídos à sua maior área.

Para um mesmo módulo, a variação temporal das exergias é função somente das condições meteorológicas. A taxa de exergia solar depende apenas da radiação solar e da temperatura ambiente; enquanto as taxas de exergia elétrica e térmica dependem da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento. Como o mês de julho apresenta maiores índices de radiação solar, as exergias foram maiores neste mês comparadas com as do mês de dezembro ou janeiro.

A exergia térmica, quando não aproveitada, se torna uma perda, reduzindo a eficiência do módulo. Ela pode ser minimizada principalmente pela minimização de dois fatores, a temperatura de operação da célula e o coeficiente de transferência de calor por convecção. A exergia elétrica depende dos parâmetros elétricos de cada célula e da tecnologia em particular. A exergia elétrica dos módulos fotovoltaicos pode ser maximizada através de algumas medidas como a redução das perdas óticas, utilização de células que absorvem diferentes espectros da radiação solar e recobrimentos dos módulos fotovoltaicos com ação antiaderente e antireflectante para aumentar a eficiência da absorção fotônica. De maneira semelhante à taxa de exergia solar, as taxas de exergia elétrica do módulo HG210 foram superiores às do módulo HG190, enquanto as taxas de exergia térmica foram aproximadamente iguais para ambas as tecnologias. Além disso, o comportamento ao longo do ano é semelhante para as três taxas de exergia, com valores maiores no mês de julho.

O acúmulo de sujidades e poeira pode afetar consideravelmente o desempenho de módulos fotovoltaicos. Piliouguine et al (2013) avaliaram a produção de energia de módulos policristalinos com e sem revestimento anti-sujidade (antiaderente). Os autores indentificaram perdas de 12% em módulos sem revestimento e 10% em módulos com revestimento. De acordo com a homogeneidade da distribuição da poeira, essas perdas podem ser ainda maiores. Appels et al (2013) desenvolveram um trabalho experimental em módulos fotovoltaicos, observando perdas entre 3 a 4% devido a deposição de sujidades, mesmo havendo chuva no período de análise. O recobrimento de módulos com filmes antiaderentes contribui com a redução do acúmulo de sujidades e minimiza as perdas por reflexão.

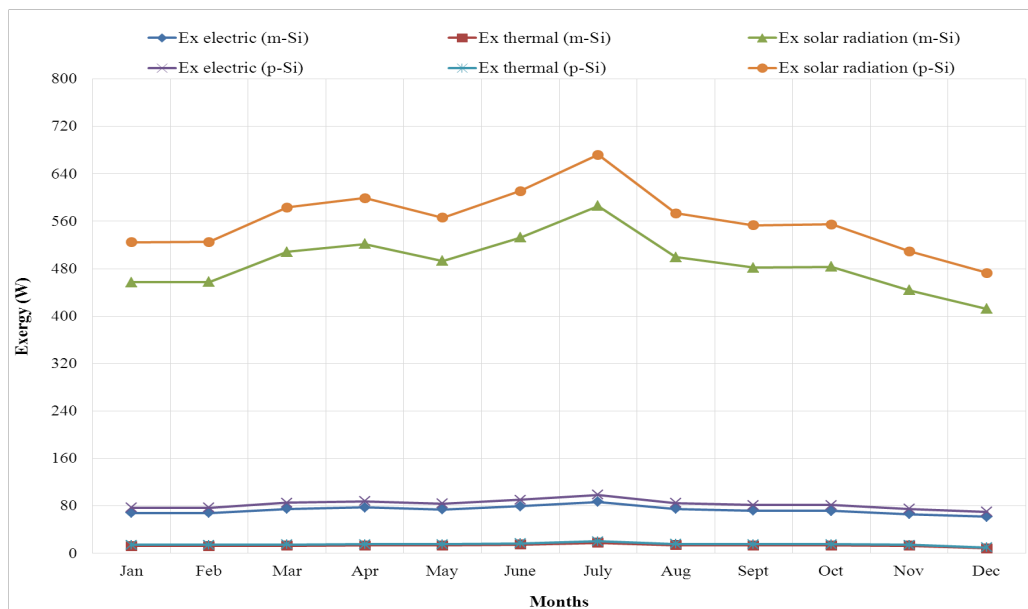


Figura 4: Médias mensais das exergias elétricas e térmicas para os módulos HG 190 e HG210

Na Figura 5 são apresentadas as médias mensais das eficiências energética e exergetica dos módulos HG 190 (monocristalino) e HG 210 (policristalino). A média mensal das eficiências energéticas do módulo monocristalino variaram entre 19,8% e 20,0% e para o módulo policristalino essa variação foi de 18,3% a 18,6%, apresentando valores aproximados para as duas tecnologias.

Os resultados da análise das eficiências exergeticas indicaram uma média mensal de 13,0 a 13,8% para o módulo PV monocristalino, e entre 12,5 e 13,3% para o PV policristalino, aproximadamente.

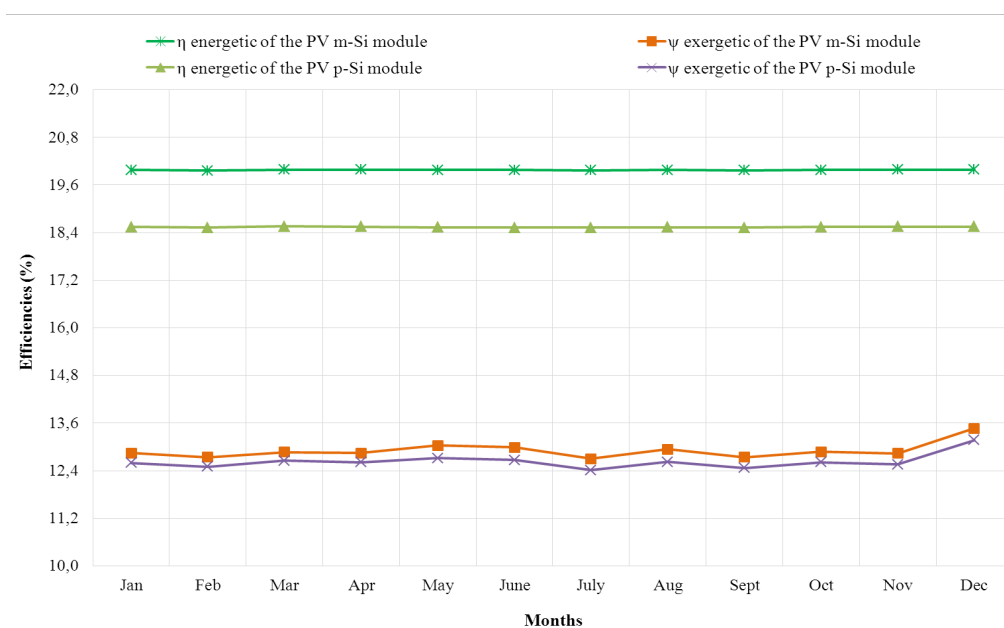


Figura 5: Médias mensais das eficiências energéticas e exergeticas para os módulos HG 190 e HG210

O módulo policristalino apresenta maior potência de saída se comparado com o

módulo monocristalino em análise, como pode ser observado na Figura 6. Porém, a área do módulo HG 210 é maior, acarretando em índices de eficiência energética mais baixos do que o HG 190. A potência de saída é dada pelo produto da tensão e corrente do módulo. O comportamento das curvas de potências de saída, mostrado na Figura 6, é um reflexo da influência da variação da radiação solar na corrente de saída dos módulos.

Esses resultados mostram que apesar de a exergia de entrada e a exergia elétrica serem mais elevadas no módulo HG 210 se comparado com o HG 190, consequência da diferença de área e da potência nominal (corrente e tensão), as eficiências energéticas e exergéticas foram maiores para o módulo HG 190 (monocristalino). Esse fato é explicado pela composição da tecnologia do módulo monocristalino, que possui silício de grau de pureza mais elevado se comparado com o policristalino. Ou seja, um módulo policristalino precisa de maior área de semicondutor para gerar o equivalente ao de um módulo monocristalino.

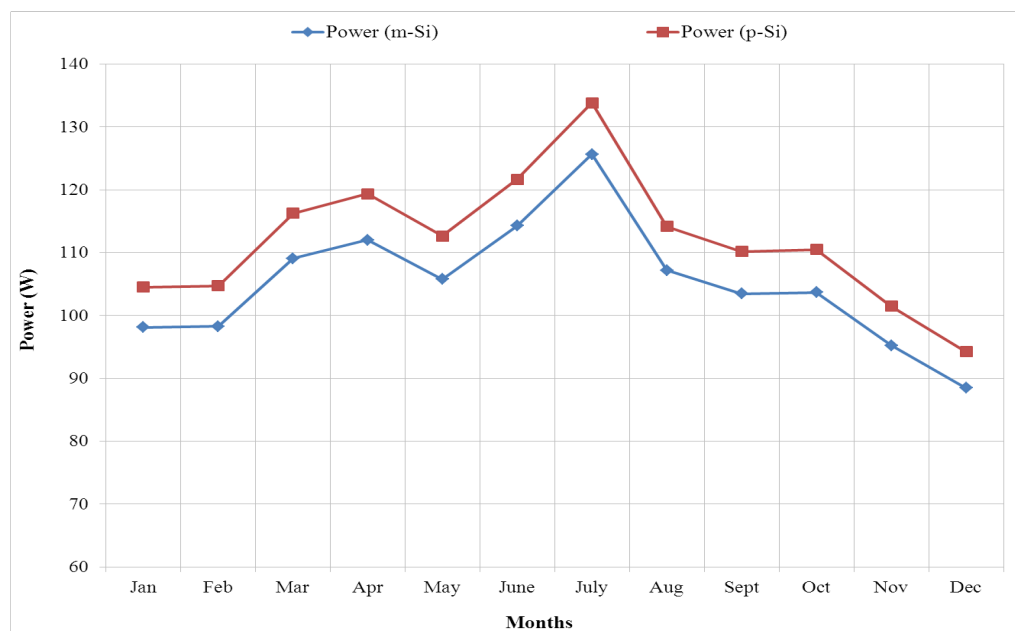


Figura 6: Médias mensais da potência de saída dos módulos HG 190 e HG210

5 | CONCLUSÕES

Este estudo possibilitou avaliar a resposta de módulos de silício monocristalino e policristalino mediante a variação dos parâmetros meteorológicos para a cidade de Belo Horizonte, Brasil, além de que a identificação das eficiências energéticas e exergéticas destas tecnologias, permite propostas objetivando o aumento desses índices, visando contribuir na redução de possíveis perdas desde o processo de absorção a conversão da energia luminosa em elétrica. As perdas principais relacionadas a tecnologia fotovoltaica estão relacionadas a geração de calor, que nesse caso, é visto como perda já que o calor é rejeitado para o meio ambiente.

O módulo de silício monocristalino, apresentou maior eficiência energética média anual, 19,9%, apesar de mais eficiente energeticamente, é influenciado consideravelmente pela variação das condições meteorológicas, apresentando eficiência exergética média anual de 13,3%, um pouco maior que a eficiência de segunda lei do módulo policristalino, 12,8%. Essa variação é explicada pela pureza do silício monocristalino ser maior em comparação com o policristalino o que resulta em um melhor desempenho.

Como foi possível observar as eficiências de segunda lei foram para todos os módulos menores que 15%, o que representa um campo de grande melhoria, principalmente no que se refere a maior utilização da exergia solar disponível e da redução das perdas térmicas. Espera-se que estes estudos incentivem ainda mais a busca por alternativas para melhorar o desempenho de sistemas fotovoltaicos que cada a cada ano aumenta a sua participação na matriz elétrica mundial, produzindo energia elétrica a partir de fonte renovável, reduzindo a dependência por combustíveis fósseis e podendo reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a chamada “energia limpa”.

6 | REFERÊNCIAS

Appels, R.; Lefevre, B.; Herteleer, B.; Goverde, H.; Beerten, A.; Paesen, R.; Medts, K.; Driesen, J.; Poortmans, J. **Effect of soiling on photovoltaic modules**. Solar Energy 2013; 96:283 – 291.

Ceylan, I.; Gürel, A.E. **Exergetic Analysis of a New Design Photovoltaic and Thermal (PV/T) System**. Published online 22 March 2015 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI 10.1002/ep.12108

Chouder, A., et al. **Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters**. Simulation Modeling Practice and Theory 2012; 20:46 – 58.

Colombo, E.; Rocco, M.V.; Toro, C.; Sciubba, E. **An exergy-based approach to the joint economic and environmental impact assessment of possible photovoltaic scenarios: A case study at a regional level in Italy**. Ecological Modelling 2014

Dincer, I. **The role of exergy in energy policy making**. Energy Policy 2002; 30:137–149.

Dincer, I., et al. **Global Warming: Engineering Solutions**, Springer New York Dordrecht Heidelberg, London, 2010.

Duffie, J.A.; Beckman, W.A. **Solar engineering of thermal processes**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 2006.

Green, M. A., et al. **Solar cell efficiency tables (Version 45)**. Progress Photovoltaic: Research and Applications 2015; 23:1 – 9.

Guimarães, A.P.C. **Estudo solarimétrico com base na definição de mês padrão e sequência de radiação diária**. 1995. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Joshi, A. S., Dincer, I., Reddy, B. V. **Performance analysis of photovoltaic systems: A review**.

Renewable and Sustainable Energy 2009;13: 1884-1897.

Lorenzo, E. **Electricidad Solar: Ingeniería de los sistemas fotovoltaicos**. 1 ed. Espanha: Progensa, 1994

Pandey, A. K.; Tyagi, V. V.; Tyagi, S. K. **Exergetic analysis and parametric study of multi-crystalline solar photovoltaic system at a typical climatic zone**. Clean Techn Environ Policy 2013; 15:333 – 342.

Piliouquine, M.; Cañete, C.; Moreno, R.; Carretero, J.; Hirose, J.; Ogawa, S.; Sidrach-De-Cardona, M. **Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates**. Applied Energy 2013, 112:626 – 634.

Sahin, A.D., Dincer, I., Rosen, M.A. **Thermodynamic analysis of solar photovoltaic cell systems**. Solar Energy Materials & Solar Cells 2007; 91:153-159.

Sarhaddi, F., et al. **Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector**. Energy and Buildings 2009; 42:2184–2199.

SolarTerra. **Datasheet – Painel Solar HG 190 e HG 210**. Disponível em:<<http://solarterra.com.br>>. Acessado em: 01 sept. 2015.

Xydis G. **On the exergetic capacity factor of a wind - solar power generation system**. Journal of Cleaner Production 2013, 47:437-445.

Yazdanpanahi, J.; Sarhaddi, F.; Adeli, M.M. **Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses**. Solar Energy 2015, 118: 197–208

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



9 788572 470667