

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ALGORITMOS APLICADOS EM
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS****COMPARATIVE ANALYSIS OF ALGORITHMS APPLIED IN
PHOTOVOLTAIC PANELS****ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALGORITMOS APLICADOS EN
PANELES FOTOVOLTAICOS**

Daniela Oliveira Teixeira de Sousa¹
Jeferson Cerqueira Dias²
Jônatas Cerqueira Dias³

Artigo recebido em junho de 2021
Artigo aceito em setembro de 2021

RESUMO

A energia solar é uma fonte de energia renovável que utiliza a irradiância da luz solar em células fotovoltaicas. Modelos, algoritmos e métodos matemáticos são utilizados para a otimização destas células. Este artigo propõe uma análise bibliográfica comparativa sobre os algoritmos meta-heurísticos para se identificar qual algoritmo apresenta a menor raiz do erro quadrático médio (*RMSE: Root Mean Square Error*), comumente utilizada para expressar a acurácia dos resultados numéricos. Um método qualitativo de revisão sistemática, orientado pelo *Methodi Ordinatio*, foi utilizado para seleção dos artigos na plataforma Dimensions.ai. Os resultados sugerem a utilização dos algoritmos genéticos para este fim, bem como o algoritmo *Firefly* para o cálculo dos parâmetros do circuito das células fotovoltaicas.

Palavras-chave: Algoritmos. *Firefly*. Genéticos. *Methodi Ordinatio*. Painéis fotovoltaicos.

ABSTRACT

Solar energy is a renewable energy source that utilizes the irradiance of sunlight on photovoltaic cells. Models, algorithms and mathematical methods are used for the optimization of these cells. This paper proposes a comparative literature review of meta-heuristic algorithms to identify which algorithm has the smallest root mean square error (RMSE), commonly used to express the accuracy of numerical results. A qualitative systematic review method, guided by *Methodi Ordinatio*, was used to select the articles on the Dimensions.ai platform. The results suggest the use of the genetic algorithms for this purpose, as well as the *Firefly* algorithm for calculating the circuit parameters of the photovoltaic cells.

Keywords: Algorithms. *FireFly*. Genetic. *Methodi Ordinatio*. Photovoltaic cells.

¹ Tecnóloga em Processos Químicos pela Fatec Praia Grande. E-mail: daniela.sousa@fatec.sp.gov.br.

² Professor mestre, Fatec Itaquera. E-mail: jeferson.dias3@fatec.sp.gov.br.

³ Professor mestre, Fatec Praia Grande. E-mail: jonatas.dias2@fatec.sp.gov.br.

RESUMEN

La energía solar es una fuente de energía renovable que utiliza la irradiación de la luz solar en las células fotovoltaicas. Se utilizan modelos, algoritmos y métodos matemáticos para optimizar estas celdas. Este artículo propone una revisión de la literatura comparativa sobre algoritmos metaheurísticos para identificar qué algoritmo tiene el error cuadrático medio más pequeño (RMSE: Root Mean Square Error), comúnmente utilizado para expresar la precisión de los resultados numéricos. Se utilizó un método cualitativo de revisión sistemática, guiado por la Methodi Ordinatio, para seleccionar los artículos en la plataforma Dimensions.ai. Los resultados sugieren el uso de algoritmos genéticos para este propósito, así como el algoritmo Firefly para calcular los parámetros del circuito de la célula fotovoltaica.

Palabras clave: Algoritmos. Luciérnaga. Genética. Methodi Ordinatio. Paneles fotovoltaicos.

1 INTRODUÇÃO

A evolução histórica da busca por energia segue uma transição lenta e sobreposta de um tipo de consumo de energia para outro. Embora seja perceptível a transformação e a criação de energia no mundo, as transições de um tipo de energia para outra levaram séculos para evoluir e estas transições não são totalmente globais, por exemplo: a madeira continua a ser a principal fonte de combustível para cozinhar em grande parte da África do Saara (PENNA, 2020). Além disto, considerar fontes de energia sustentáveis é uma questão fundamental.

No início da Idade Moderna (1.400 d.c) o homem, a partir de sua sapiência, introduziu a energia de origem fóssil, predominantemente o carvão mineral, para produção siderúrgica⁴ (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Uma demanda crescente por recursos e o avanço tecnológico tem requerido maior intensidade por fontes de energia em escala mundial. Isto passou a ocorrer desde que o homem desenvolveu diversas práticas transformadoras no ambiente ao seu redor, incluindo a busca por novas fontes de geração de energia (MORAIS, 2015).

Isto leva a uma reflexão de uma perspectiva sobre as futuras transições de energia e os meios de utilização de fontes de energia sustentáveis que reduzam as pegadas dos combustíveis fósseis. Isto requer a avaliação de energias que estão na vanguarda da sustentabilidade, examinando fontes verdes, como: energia solar, energia eólica e energia hidrelétrica (PENNA, 2020). Um desafio, diante da longevidade das transições de energia, é a redução dos tempos de transição, uma vez que os desenvolvimentos tecnológicos fornecem fontes de energia baratas e seguras que podem reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Como é o caso da aplicação da conversão da energia solar, por meio de células fotovoltaicas (FV⁵) (PENNA, 2020).

Após a revolução industrial, é percebido o intenso progresso de fontes de energia alternativa, em substituição a geração da energia elétrica, por exemplo. A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia alternativa, considerada limpa, renovável e segura. Essa energia é produzida a partir da conversão direta da luz solar em energia elétrica, por

⁴ A siderurgia brasileira tem como marco histórico a instalação de uma pequena produtora de ferro por Afonso Sardinha, em 1557, em São Paulo (ANDRADE; CUNHA, 2002).

⁵ FV - Abreviação de fotovoltaica.

meio do efeito fotovoltaico. Este efeito é a excitação de elétrons, devido às características de alguns materiais semicondutores na presença de luz solar (LOPES FILHO, 2018).

A busca pela inserção da energia solar na matriz energética mundial aumentou 395% da produção primária dessa energia entre 2003 e 2013. Neste mesmo período, houve um crescimento de 17% na produção total de energia, enquanto as fontes renováveis tiveram um crescimento de 56% (LOPES FILHO, 2018).

Segundo dados do relatório da Agência Internacional de Energia⁶, no ano de 2014 foram inseridos 38,7 GWp em instalações fotovoltaicas na rede elétrica mundial (LAGO; DELABENETA, 2018). Em termos globais, no final de 2014 já havia aproximadamente 177 GWp de potência em instalações fotovoltaicas. O desenvolvimento da energia solar fotovoltaica pode contribuir de maneira significativa na diversificação da matriz elétrica brasileira, podendo ser utilizada para preservar as fontes tradicionais de energia, seja pela economia de combustíveis fósseis ou pela preservação do nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas (LAGO; DELABENETA, 2018).

A energia renovável nunca foi tão importante como hoje, já que a mudança climática se torna indiscutivelmente o problema mais essencial do mundo a ser resolvido. A solução a este problema é desafiador, uma vez que economias emergentes ainda estão consumindo, e em ritmo crescente, combustíveis fósseis. Os países emergentes que utilizam fontes de energia renováveis e não renováveis são: Brasil, China e Índia. Esses países estão na lista junto com os países desenvolvidos no que se refere a investimento de energia limpa (WANG, 2020).

Os países emergentes citados acima ultrapassaram em 2015 o investimento global de energia limpa. No entanto, em 2016 os países desenvolvidos voltaram a liderar no investimento em energia limpa, resultando em novas unidades de energias renováveis e políticas introduzidas pelos governos. As tendências de investimento em energia limpa têm variado amplamente em regiões em todo o mundo (WANG, 2020).

Na cidade de Shenzhen localizada ao longo da Costa Sul da China estimulou o crescimento econômico logo após um possível colapso da economia socialista em 1980. A cidade tem uma infraestrutura altamente desenvolvida, possibilitando o comércio e a facilidade na entrega de produtos (ANTUNES; SILVA; HERMIDA, 2020). Em 2017 Shenzhen implementou ônibus elétricos com baterias (antes movido através de combustíveis fósseis), tornou-se a primeira metrópole mundial com frota urbana totalmente elétrica. Antes de aderir a esta inovação, a cidade era poluída como São Paulo e em apenas dez anos limpou o ar com a substituição radical de veículos a gasolina e diesel por uma frota totalmente elétrica (ANTUNES; SILVA; HERMIDA, 2020). A cidade contém atualmente a maior frota de ônibus elétrico do planeta, composta por 16.359 mil ônibus, superando cidades importantes como Nova Iorque, Los Angeles, Nova Jersey, Chicago e Toronto. Os ônibus elétricos são abastecidos por 26 estações de recarga, sendo estações de consumo de eletricidade em grande escala (ANTUNES; SILVA; HERMIDA, 2020). As estações de recarga na China têm o objetivo de evitar o congestionamento com outras cargas na rede de distribuição e estão conectadas em subestações transformadoras exclusivas (LIN et al., 2019).

Atualmente Shenzhen possui uma demanda crescente de energia solar como alternativa energética por conta dos níveis crescentes de emissão de GEE⁷. No entanto, a energia fotovoltaica depende das condições climáticas locais quando o painel é instalado.

⁶ Agência Internacional de Energia em inglês: *International Energy Agency* (IEA) é uma organização internacional sediada em Paris ligada a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) <https://www.iea.org/>.

⁷ GEE - Emissões de Gases do Efeito Estufa (SOARES; CUNHA, 2019).

Contudo, sua natureza intermitente torna a saída de energia fotovoltaica inerente deficiente. A capacidade de energia fotovoltaica na China obteve um aumento de 0,14 GW em 2008 para 174,6 GW em 2018. As províncias com alta capacidade estão concentradas no Noroeste, Norte e Leste da China (HE, X. et al., 2020).

A integração de geradores fotovoltaicos com um sistema de armazenamento adequado, baseado na produção de hidrogênio eletrolítico⁸, pode superar a intermitência da geração de energia fotovoltaica, de forma que o vento, a energia fotovoltaica e as células de combustível⁹ podem ser projetados para fornecer energia de forma contínua (TANG et al., 2014).

São muitos os desafios pelos quais esses países, principalmente o Brasil, se esforçam para promover o uso de energias renováveis, com recursos limitados. Como solução a boas políticas governamentais e estratégias corporativas são essenciais para apoiar esses esforços como parte da crise global da mudança climática (WANG, 2020). Isso deve ajudar a reduzir a poluição ambiental e ajudar com o cumprimento dos compromissos do Acordo de Paris (assinado em abril de 2016). Muitos países promulgaram novas políticas para o aumentando do uso de energia limpa e a redução do consumo de combustível fóssil (WANG, 2020).

No Brasil tem havido preocupações com o cancelamento dos leilões de energia. Esse cancelamento está sendo induzido por conta do declínio da demanda de eletricidade e as recentes crises econômicas. Os cancelamentos causaram incertezas nos crescentes mercados de tecnologia limpa e renovável (WANG, 2020). No entanto a energia solar fotovoltaica apresenta um grande potencial para o país e já se consolida com uma fonte bem desenvolvida tecnologicamente para produção de energia elétrica (LAGO; DELABENETA, 2018).

Os desafios existentes no Brasil, no que tange à energia solar fotovoltaica, vêm sendo superados lentamente, mostrando uma evolução no setor nos últimos anos. Ainda há diversos desafios para que esta fonte de energia renovável seja implantada com menores obstáculos no país (LAGO; DELABENETA, 2018).

Este trabalho vai ao encontro desta necessidade, quando aborda questões de desenvolvimento de soluções, no uso de modelagem matemática e algoritmos como proposta para encontrar os parâmetros de otimização e de avaliação de desempenho de células fotovoltaicas. Contudo, para solucionar este problema, é fundamental utilizar algoritmos que não sejam derivados no gradiente da função e escolher um tipo de algoritmo meta-heurístico¹⁰ que neste caso é sugerido o algoritmo genético. Este algoritmo efetua a busca direcionada garantindo a convergência para uma boa solução. Isto levou a seguinte questão: “*Qual seria o melhor algoritmo que proporciona o melhor desempenho para identificar estes parâmetros?*”.

Aliado a esta questão, esta pesquisa se orienta pela seguinte hipótese: o algoritmo genético é sugerido como o melhor algoritmo para determinação dos parâmetros necessário ao painel fotovoltaico.

Para direcionar a conduta dos estudos e a verificação da hipótese, decidiu-se como objetivo geral, a realização de uma pesquisa bibliográfica; com busca sistematizada e a

⁸ Hidrogênio eletrolítico – Substância que usa a eletricidade para dividir a água em hidrogênio e oxigênio (KUMAR; HIMABINDU, 2019).

⁹ Células de combustível – Células galvânicas nas quais a energia de GIBBS de uma reação química é transformada em energia elétrica por meio da geração de uma corrente (RODRIGUES, R et al., 2019).

¹⁰ Algoritmos meta-heurísticos são baseados em iteração populacional nas técnicas de otimização. Eles não impõem restrições à formulação do problema e têm a capacidade de resolver vários problemas complexos (LONG et al., 2020).

tomada de decisões do corpus bibliográfico balizada pelo *Methodi Ordinatio*; acerca da implementação de algoritmos em painéis fotovoltaicos, com foco nos algoritmos genéticos. Como análise deste objetivo se utilizou dos seguintes objetivos específicos:

- a) Esclarecer o funcionamento desse algoritmo em painéis fotovoltaicos para converter a energia solar em elétrica;
- b) Comparar as informações fornecidas dos Algoritmos Genéticos com outros algoritmos, como por exemplo, o *Firefly*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os painéis solares fotovoltaicos são os principais componentes do sistema fotovoltaico de geração de energia. Ambos são formados por um conjunto de células fotovoltaicas associadas eletricamente, em série e / ou paralelo dependendo das tensões e / ou correntes determinadas em projeto. O conjunto destes módulos é chamado de gerador fotovoltaico e constituem a primeira parte do sistema, ou seja, são os responsáveis no processo de captação da irradiação solar e a sua transformação em energia elétrica (LANA et al., 2015).

2.1 Painéis Fotovoltaicos

O efeito fotovoltaico foi observado em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel em uma solução de selênio. Becquerel observou o aparecimento de uma tensão entre os eletrodos de solução condutora, quando esta era iluminada pela luz solar. Em 1870 o estudo do efeito fotovoltaico foi sendo aperfeiçoado, pois logo depois, o físico Becquerel estudou o efeito de sólidos como já foi citado acima o selênio, só que essa substância num estado sólido e não dissolvido em uma solução (COSTA, 2019).

Dez anos depois em 1880 a primeira célula fotovoltaica foi construída utilizando selênio com eficiência na faixa de 2%. Depois de um século, nos anos 50 iniciou a fabricação das primeiras células fotovoltaicas no *Bell Labs*¹¹ (Laboratórios Bell) nos Estados Unidos, no qual se produziu a primeira célula fotovoltaica de silício de junção de PN. Na época esses dispositivos chegavam a atingir uma eficiência de conversão de energia solar em elétrica alta com a potência de 5 mW e uma área de 2 cm² (COSTA, 2019).

O princípio de funcionamento ocorre quando a luz do sol penetra na célula fotovoltaica, produzindo uma pequena corrente elétrica que é recolhida por fios ligados à célula e logo depois é transferida para os demais componentes do sistema, assim sendo, quanto mais células fotovoltaicas são ligadas em série, ou em paralelo, maior será a corrente e tensão produzidas (CRESESB, 2006).

Os sistemas fotovoltaicos são utilizados em instalações remotas, havendo há possibilidade de diversos projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. O sistema fotovoltaico possui facilidades como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazendo com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica (CRESESB, 2006).

Para que ocorra o efeito fotovoltaico são utilizados materiais semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia, de elétrons (banda de valência) e outra totalmente “vazia” (banda de condução). O semicondutor mais utilizado nesses sistemas é o silício. Os átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons na camada de valência,

¹¹ <https://www.belllabs.com/>.

formando uma estrutura cristalina (CRESESB, 2006).

Atualmente varias tecnologias de células fotovoltaicas se distinguem pelos materiais que as constituem e pelo grau de maturidade. São categorizadas por três gerações (COSTA, 2019). Na primeira geração as células fotovoltaicas são constituídas por silício cristalino (c-Si), podendo ser monocristalino (mc-Si) ou policristalino (pc-Si) com o grau de maturidade de completa comercialização.

Nas células de segunda geração a tecnologia é baseada em um *thin film* (filme fino), dos quais podem ser de três tipos: i) silício amorfo (a-Si) e silício microamorfo (a-Si/ μ c-Si); ii) *cadmium telluride* (CdTe); iii) *copper indium selenide* (CIS) e *copper indium-galladium diselenide* (CIGS). A existência dessa tecnologia surgiu com o foco de produzir células com um custo menor. De fato, este tipo de células precisa de uma menor quantidade de material para absorver a mesma quantidade de radiação solar quando comparadas com as células de primeira geração (99% menos material do que as células cristalinas). Para que haja o menor custo, este módulo é mais flexível e mais leve, permitindo aplicações mais variadas como, por exemplo, em edifícios e estruturas com suporte menos robusto. Com toda essa descrição, as células *thin film* começam a ser cada vez mais procuradas.

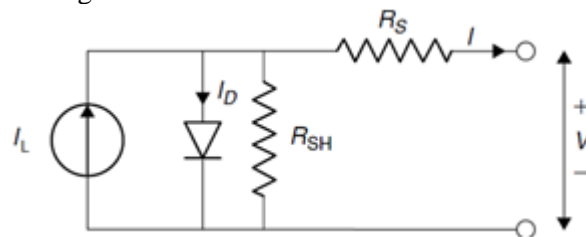
As de terceira geração são células constituídas com tecnologias denominadas de: FV orgânicas, FV de concentração¹², FV sensibilizadas corantes e nano-cristalinas. Estas células apresentam eficiência de 46% comparativamente com a primeira e a segunda geração, cuja eficiência é de 21 e 27% respectivamente. Isto porque elas se utilizam de recursos como espelhos e lentes que são capazes de focar, direcionar e concentrar a radiação solar numa determinada região da célula (COSTA, 2019).

Mundialmente, as células baseadas em silício cristalino representam cerca de 85% da produção anual de eletricidade com origem fotovoltaica. Percebe-se que as células *thin film* têm sido cada vez mais procuradas, representando cerca de 20% das instalações. Em 2017, as células da primeira geração distribuíram cerca de 60% da capacidade instalada de células de silício policristalino e 40% de células de silício monocristalino (COSTA, 2019).

2.2 Modelo do Painel Fotovoltaico

Percebe-se que a representação do comportamento de uma célula fotovoltaica através de circuitos elétricos equivalentes, se tornou bastante comum no estudo desta tecnologia. Os modelos, utilizados largamente neste ramo industrial de energia solar, correspondem a: i) um modelo simplificado de um diodo com três parâmetros e ii) outro mais detalhado que é o modelo de um diodo e cinco parâmetros, Figura 1. Com estes modelos é possível obter características I-V¹³ (corrente-tensão) do painel em determinadas circunstâncias, recorrendo somente a dados fornecidos pelo fabricante do painel.

Figura 1 – Modelo de circuito de um diodo



Fonte: Pinto (2016)

¹² Também chamada de CPV do inglês *concentrated photovoltaics*.

¹³ A curva I-V (curva de corrente vs. tensão) determina a característica de cada painel e de cada arranjo fotovoltaico. É uma informação valiosa para gerenciamento, operação e manutenção de sistemas fotovoltaicos.

O modelo com cinco parâmetros permite obter resultados mais rigorosos nas simulações em painéis fotovoltaicos. Este modelo é representado pela fonte de corrente IL (*Light Current*) em paralelo com o diodo ideal de junção p-n. Tal que IL representa a corrente elétrica gerada na célula sob a presença de luz. Quando há ausência de luz, a célula se compara como um diodo, não produzindo qualquer tensão ou corrente (PINTO, 2016).

Entretanto, dado ao comportamento não ideal da célula, acresce-se ao modelo a resistência em série R_s , representativa das perdas nos contatos, e a resistência R_{sh} (*shunt resistance*) que representa a existência de correntes de fuga. Os cinco parâmetros a serem determinados para o modelo apresentado são: i) as duas resistências R_s e R_{sh} , ii) o fator de idealidade do díodo n , iii) a corrente IL e iv) a corrente inversa de saturação do díodo I_d (SOARES, 2016).

Os cálculos dos cinco parâmetros do modelo de um diodo são realizados apenas com dados fornecidos pelo fabricante¹⁴ (*datasheets*) e são medidos em “Condição de Teste Padrão” (CTP) (PINTO, 2016). Entretanto, os painéis fotovoltaicos não operam nestas condições padrões. Portanto, é necessário desenvolver métodos que atualizem os parâmetros em função das variações, para analisar a potência real gerada pelo painel fotovoltaico (PINTO, 2016).

Esses painéis são modelados de forma que o circuito elétrico equivalente represente seu comportamento. A estimação de parâmetros é um problema multivariável, não linear, não convexo, com vários mínimos locais e pode ser representado como um problema de minimização (PINTO, 2016).

Desta forma, é necessário utilizar técnicas de estimação de parâmetros para que eles representem o painel da melhor forma possível. Para isto são utilizados algoritmos computacionais para amenizar este problema (PINTO, 2016).

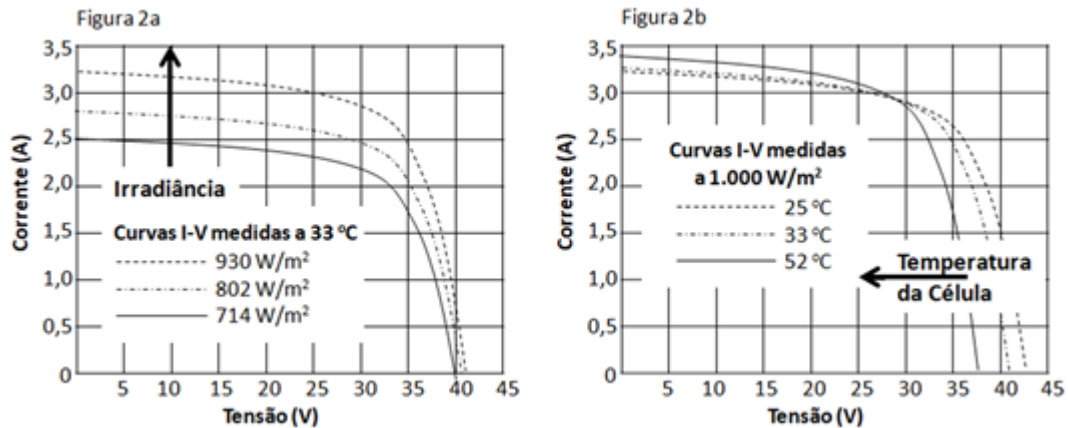
O conjunto de medições distintas de temperatura e irradiância¹⁵ irão afetar os valores dos parâmetros medidos, havendo apenas uma curva I-V características para cada conjunto de medições (PINTO, 2016). A consequência mais visível a variações no valor de irradiância é o aumento linear da corrente de curto circuito com a irradiância, sendo igualmente visível um aumento menor da tensão de circuito aberto (PINTO, 2016).

O principal efeito de um aumento da temperatura na célula é na tensão de circuito aberto, que diminui linearmente com o argumento da temperatura, tendendo a diminuir a eficiência da célula (PINTO, 2016), Figura 2.

¹⁴ Boa parte dos *datasheets* disponibilizados são retirados em condições de teste padrão a uma temperatura referência de célula (T_{ref}) de 25°C, com uma irradiância de 1.000 W/m^2 (S) e AM=1.5. AM: coeficiente de massa de ar (PINTO, 2016).

¹⁵ Irradiância solar (medida em W/m^2) é o valor instantâneo da radiação solar incidente em W/m^2 . Representa o fluxo de energia radiante INSTANTÂNEO incidente sobre uma superfície, real ou imaginária, por unidade de área. Irradiação solar é a irradiância durante um período de tempo (medida em Wh/m^2). Desta forma a IRRADIAÇÃO é a QUANTIDADE de energia radiante que incide em uma superfície durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área desta (ENERGES, 2020).

Figura 2 – Efeito da irradiância e temperatura no comportamento da curva IV e o efeito do aumento da temperatura



Fonte: adaptado de Pinto (2016)

A função objetivo dos algoritmos corresponde à minimização do erro quadrático médio entre a curva característica IV experimental do painel em relação à curva IV que é gerada pelos parâmetros estimados. Para minimizar este erro, deve ser utilizada a raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*). O cálculo do *RMSE*¹⁶, Equação 1, é realizado em relação aos pontos de corrente e tensão disponibilizados no *datasheet* do painel fotovoltaico do modelo Kyocera KC200GT (LI et al., 2020).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2} \quad (1)$$

Portanto, para cada valor do parâmetro *n* e do parâmetro *Rs*, ocorrerá a plotagem de uma curva e o é calculado entre esta curva e os pontos do *datasheet*. Quanto menor for o *RMSE*, mais adequados estarão os parâmetros *n* e *Rs*, e mais a curva encontrada se aproxima da curva real (LI et al., 2020).

3 MÉTODO

A pesquisa qualitativa foi abordada para elaboração desta pesquisa porque depende de diversos fatores, tais como a natureza dos dados coletados, a extensão da amostra, os instrumentos de pesquisa utilizados e os pressupostos teóricos que encadearam a investigação. Contudo, esse processo é uma sequência de atividades, envolvendo a redução de dados, a classificação desses dados, a interpretação e a redação do relatório (GIL, 2002).

Este estudo consiste em uma pesquisa bibliográfica, efetuando-se consultas de artigos científicos, livros, dissertações e teses.

A plataforma de busca para elaboração desta pesquisa foi: i) Dimensions.ai: fundada

¹⁶O chamado erro quadrático médio (*MSE: mean square error*) representa a média dos quadrados dos erros e é calculado dividindo-se *SSE* pelo período total *T*. Da mesma forma que o *SSE*, é sempre positivo e um valor de *MSE* = 0 indica ajuste perfeito. A raiz quadrada do *MSE*, ou raiz do erro quadrático médio (*RMSE: root mean square error*) é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que *RMSE* apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada (LI et al., 2020).

em 2018. É uma plataforma que fornece uma visão mais ampla do ciclo de vida de uma pesquisa. As publicações são registradas através de metadados de artigos, periódicos e livros.

Nesta plataforma é possível efetuar uma busca geral, pesquisando em todos os acervos físicos, além dos materiais digitais disponibilizados pela Universidade de Michigan, Universidade de Massachusetts Lowell e Universidade da Califórnia.

Os descritores (palavras-chave) definidos para a pesquisa na busca desta plataforma foram: {"Photovoltaic cell", "Algorithm\$" e "Algorithm\$ for photovoltaic cell"}. Estes descritores foram aderidos após a realização de testes com outros termos com foco na obtenção dos melhores resultados para o trabalho proposto. As opções de configuração selecionadas no mecanismo de busca definiram-se conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Configuração do mecanismo de busca pela plataforma Dimensions.ai

Tipo de material	Todos os tipos	Idioma	Qualquer idioma
Data de publicação	2021, 2020, 2019, 2018, 2017	Tipo de Acesso (<i>Open Access</i>)	Não preenchidos

Fonte: autores

Na pesquisa se realizou uma análise bibliométrica de dados, que incluiu as palavras-chave de acordo com o tema proposto e a aderência dos artigos ao tema, por meio de leituras de títulos e resumos conforme o *Methodi Ordinatio* (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015).

A leitura sistemática é feita após a identificação da relevância científica conforme os valores do *InOrdinatio* que é obtido através da Equação 2 do *Methodi Ordinatio*, empregando três fatores: número de citações, ano de publicação e fator de impacto de cada artigo, permitindo a ordenação dos estudos de acordo com esses parâmetros científicos (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015).

$$\text{InOrdinatio} = (\text{IF} / 1000) + (\alpha * (10 - (\text{Research Year} - \text{Publish Year}))) + (\text{Ci}) \quad (2)$$

O *IF* na fórmula significa o fator de impacto, α é um fator de ponderação que varia de 1 a 10 a ser atribuído pelo pesquisador; *Research Year* é o ano em que a pesquisa foi desenvolvida; *Publish Year* é o ano em que o artigo foi publicado; e *Ci* é o número de vezes que o artigo foi citado na base de dados (PAGANI; KOVALESKI; RESENDE, 2015).

Para a construção e visualização de redes bibliométricas foi utilizado o *software* VosViewer, que explora mapas bibliométricos baseados nos dados de redes (GUIMARÃES, 2019). Para explorar as publicações no VosViewer é necessário trabalhar separadamente com os arquivos exportados em uma única base de dados (GUIMARÃES, 2019). No caso desta pesquisa, optou-se pela utilização de 98 artigos na base Dimensions.ai.

A separação será obtida através das técnicas de leitura exploratória e seletiva no material coletado, inicialmente para uma separação primária e posteriormente a aplicação de

técnicas de leitura analítica e interpretativa. A leitura analítica tem o foco em se basear nos textos selecionados, mesmo podendo ocorrer à necessidade de adicionar novos textos e a eliminação de outros tantos, o pesquisador deverá assumir a postura de analisar os textos de maneira definitiva. Contudo, a leitura analítica ordena e sintetiza as informações contidas nas fontes, de forma que possibilitem a obtenção das respostas no problema de pesquisa (GIL, 2002).

A leitura interpretativa é a última etapa do processo de leitura das fontes bibliográficas. É diferente da leitura analítica, pois é mais complexa já que tem o foco em relacionar o que o autor afirma com o problema proposto na solução. Na leitura interpretativa, encontra-se verificar o significado mais amplo aos resultados obtidos com a leitura analítica (GIL, 2002).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação do método proposto resultou na seleção de um conjunto de artigos aderentes a proposta de pesquisa, trazendo à tona as seguintes argumentações. De acordo com Martin, Aranzazu D. et. al (2020), o Algoritmo *Swarm* no geral tem o desempenho mais baixo na questão do *RMSE* em relação aos Algoritmos Genéticos. Identifica os cinco os valores dos parâmetros do circuito mais baixo que o Algoritmo *Firefly*. A precisão nos parâmetros do circuito de um diodo, em ambos os algoritmos é alta. A desvantagem do Algoritmo *Swarm* é a variação da corrente e tensão que é mais alta que os Algoritmos Genéticos.

As vantagens do método de *Newton-Raphson* são: a precisão e rapidez no cálculo do *RMSE* e não linear entre a tensão de saída e a corrente do painel fotovoltaico. No entanto, a desvantagem desse método é que apresenta o valor alto no cálculo do *RMSE* no circuito de um diodo. Contudo, os Algoritmos Genéticos é a melhor alternativa porque mostra *RMSE* mais baixo tendo menos variação na corrente e tensão do circuito. Porém, assim como o *Newton Raphson* ambos não estimam os cinco parâmetros no circuito de um diodo no modelo KYOCERA KC200-GT (MANAI; ARMI; BESBES, 2017).

Os Algoritmos *Firefly*, *Cuckoo*, *Bat*, *Bee* e *Levenberg- Marquardt* tem mais vantagens no desempenho dos cinco parâmetros do circuito de um diodo. Porém, a desvantagem é o *RMSE* tendo menos mais variação na corrente e tensão do circuito de um diodo (CHEN; YU, 2019). Entretanto, o Algoritmo *Firefly* apresenta uma grande vantagem em relação à estimação de todos os parâmetros do modelo KYOCERA KC200-GT com bom desempenho.

O *Newton-Raphson* e os Algoritmos Genéticos são bastante promissores para estimar os parâmetros do circuito de um diodo. No entanto, percebe-se que os Algoritmos Genéticos apresentam valores menores nos parâmetros. No entanto, o *Newton-Raphson* apresentou valores menores no *Rsh* e no I_0 do que os Algoritmos Genéticos, mas é uma diferença pequena, exceto do *Rsh* (RAVINDRA; SULTHANA, 2021).

De acordo com Bastidas-Rodriguez et al. (2017), o *Newton-Raphson* é um algoritmo de otimização do tipo determinístico possui uma boa performance na estimação dos parâmetros do circuito de um diodo. No entanto, quando se trata do *RMSE* o algoritmo apresenta erro maior na convergência. Contudo, os Algoritmos Genéticos apresentou o menor valor de *RMSE* e no cálculo dos parâmetros n e R_s mostrou valores coerentes. No entanto, é observado que os parâmetros estimados, no modelo KYOCERA KC200-GT, mostram valores maiores que o Algoritmo *Firefly* (KUMAR, MADHAV et al., 2019).

O Algoritmo Firefly apresentou valor maior no *RMSE* em relação aos Algoritmos Genéticos (WAHID; GHAZALI; ISMAIL, 2019). Entretanto, em relação aos cinco parâmetros, o algoritmo *Firefly* minimizou os parâmetros n , R_s , R_{sh} , I_0 e I_{irr} e este algoritmo já está mais adequado para estimar todos os parâmetros do circuito de um diodo do modelo do painel KYOCERA KC200-GT porque este modelo é projeto com o circuito de um diodo (WAHID; GHAZALI; ISMAIL, 2019).

O Algoritmo *Bat* apresenta melhores resultados nos parâmetros do circuito se for comparado com os Algoritmos Genéticos. O Algoritmo *Bat* apresenta estagnação no RMSE, enquanto os Algoritmos Genéticos apresentam um comportamento de convergência com RMSE menor no momento em que está sendo simulado no painel fotovoltaico (CUI; LI; ZHANG, 2019).

Os Algoritmos *Levenberg-Marquardt* e *Firefly* mostraram o cálculo do *RMSE* maior que os Algoritmos Genéticos. Porém, os valores dos parâmetros obtidos no circuito de um diodo, foram maiores do que os do Algoritmo *Firefly* (BLAIFI, SID-ALI et al., 2018).

Os Algoritmos *Bee*, *Cuckoo* apresentam o *RMSE* maior que os Algoritmos Genéticos, no entanto percebe-se que os parâmetros do circuito apresentaram valores maiores do que o Algoritmo *Firefly* (CHEN; LAGHROUCHE; DJERDIR, 2020). Todos os algoritmos foram testados no modelo KYOCERA KC200-GT (modelo de um diodo).

Estas argumentações resultaram na Figura 3. Com o cruzamento entre os autores e as características de desempenho no cálculo do *RMSE* e dos parâmetros do modelo de circuito de um diodo com 5 parâmetros conforme o painel KYOCERA KC200-GT.

Figura 3 – Comparação do desempenho do RMSE e dos Parâmetros dos Algoritmos obtidos na literatura

Autor (es)	Algoritmo																
	Genético		Newton-Raphs		FireFly		Cuckoo		Bat		Bee		Levenberg		Swarm		
	RMSE	Parâm	RMSE	Parâm	RMSE	Parâm	RMSE	Parâm	RMSE	Parâm	RMSE	Parâm	RMSE	Parâm	RMSE	Parâm	
A																1	
B	1	0	1	0													
C					0	1	0	1	0	1	0	1	0	1			
D	1	0	1														
E	1	0	0	1	1	1											
F	1				0	1											
G	1	0					0	0	0	1	0	0					
H	1	0			0	1							0				
I	1					1	0	0			0	0					

Legenda: 1 = Cálculo satisfatório 0 = Cálculo NÃO satisfatório. Parâm = Parâmetro

Legenda de Autor(es)					
A	Martin, A. D. et al. (2020)	D	Ravidra, K.; Sulthana, S. M. (2021)	G	Cui, Z.; Li, F.; Zhang, W. (2019)
B	Manai, L.; Armi, F.; Besbes, M.(2017)	E	Bastidas-Rodriguez et al. (2017)	H	Blaifi, S et al. (2018)
C	Chen, K.; Laghrouche, S. (2020)	F	Wahid, F.; Ghazali, R.; Ismail, L.H.(2019)	I	Chen, X.; Yu, K. (2019)

Fonte: autores

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme validação da hipótese proposta nesta pesquisa, os Algoritmos Genéticos se baseiam em métodos heurísticos de busca aleatória, sendo inspirado pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação.

Os Algoritmos Genéticos são implementados de tal forma que uma população de representações abstratas de solução é selecionada em busca de soluções melhores por meio de operadores de mutação e reprodução. Os Algoritmos Genéticos utilizam transições probabilísticas e não regras determinísticas.

O Algoritmo *Firefly* é baseado em métodos heurísticos, conforme a observação da luz quando os vaga-lumes estão piscando e na caracterização da bioluminescência de cada indivíduo. A implementação do Algoritmo *Firefly* é de tal forma embora a biologia não conheça por completo a utilização da luminosidade dos vaga-lumes, já identificaram algumas funções como: os vaga-lumes são atraídos por um único sexo, a atração da luz é proporcional ao brilho e se caso não exista nenhum vaga-lume com brilho mais intenso, eles se moverão aleatoriamente.

Diante do portfólio de artigos selecionados para o estudo, conclui-se que o Algoritmo *Firefly* se mostrou melhor para estimar os cinco parâmetros do circuito de um diodo no modelo do painel KYOCERA KC200-GT. Enquanto que os Algoritmos Genéticos mostraram-se com melhor desempenho para o cálculo do valor de *RMSE*.

Ambos os algoritmos estudados apresentaram bom desempenho, com relação aos demais. No entanto, é preciso verificar a existência de algumas limitações, por exemplo: os Algoritmos Genéticos caso não tenham uma boa configuração de execução, poderá ocorrer problemas de convergência no processo de busca, requerendo um número maior de avaliações da função de aptidão (MENEZES; FREITAS; PARPINELI, 2016). Já o Algoritmo *Firefly* poderá ser necessário um número maior de iterações para otimização correta de funções mais complexas, resultando em um alto custo computacional (MENEZES; FREITAS; PARPINELI, 2016).

6 REFERÊNCIAS

AHMED, B. M. et al. **Optimum Efficiency of PV Panel Using Genetic Algorithms to Touch Proximate Zero Energy House (NZEH)**. Civil Engineering Journal, v. 5, n. 8, p. 1832–1840, 2019.

ANDRADE, M. L. A. DE; CUNHA, L. M. DA S. **BNDES 50 Anos - Histórias Setoriais: O Setor Siderúrgico**. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13314/1/BNDES_50_Anos_-_Histórias_Setoriais_O_Setor_Siderurgico_P.pdf>. Acesso em: 15 out. 2020.

ANTUNES, N. B.V; SILVA, S.J; HERMIDA, C.C. **Metrópole chinesa inteligente de Shenzhen: lições para mobilidade urbana**. p. 244–257, 2020.

CRESESB - Centro De Referência Para Energia Solar E Eólica Sérgio De Salvo Brito; **Energia Solar: Princípios e Aplicações**. Tutorial Solar, 2006.

BASTIDAS-RODRIGUEZ, Juan David et al. **A genetic algorithm for identifying the single diode model parameters of a photovoltaic panel**. *Mathematics and Computers in Simulation*, v. 131, p. 38-54, 2017.

BLAIFI, Sid-ali et al. **An enhanced dynamic modeling of PV module using Levenberg-Marquardt algorithm**. *Renewable Energy*, v. 135, p. 745-760, 2019.

CHEN, Kui; LAGHROUCHE, Salah; **DJERDIR, Abdesslem. Health state prognostic of fuel cell based on wavelet neural network and cuckoo search algorithm.** ISA transactions, 2020.

BRITO, M. C.; SILVA, J. A. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. **O Instalador**, v. 25, n. 676, p. 07, 2006.

CHEN, Xu; YU, Kunjie. **Hybridizing cuckoo search algorithm with biogeography-based optimization for estimating photovoltaic model parameters.** Solar Energy, v. 180, p. 192-206, 2019.

COSTA, D. M. R. C. **Monitorização e análise da performance de duas centrais fotovoltaicas em Inglaterra.** 2019. 114 f. 2019. Dissertação de Mestrado.FEUP - Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto,2019.

CUI, Zhihua; LI, Feixiang; ZHANG, Wensheng. **Bat algorithm with principal component analysis.** **International Journal of Machine Learning and Cybernetics**, v. 10, n. 3, p. 603-622, 2019.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4ªed. São Paulo: Atlas, 2002.

ENERGES. Disponível em: <<https://energes.com.br/fale-energes/diferenca-de-irradiancia-e-irradiacao/>>. Acesso em: 11 abr. 2021.

GIMENES, André Luiz Veiga; UDAETA, Miguel Edgar Morales; SANTO, silvio Giuseppe di. **Armazenamento de energia: Abordagens sistemáticas referentes aos sistemas elétricos de potência: armazenamento de energia: abordagens sistemáticas referentes aos sistemas elétricos de potência.** Jundiaí: Paco e Littera, 2020.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energias renováveis: um futuro sustentável.** Revista USP, n. 72, p. 6-15, 2007.

GUIMARÃES, André José Ribeiro; BEZERRA, Cicero Aparecido. **Gestão de dados: uma abordagem bibliométrica.** Perspectivas em Ciência da Informação, v. 24, n. 4, p. 171-186, 2019.

HE, X. et al. **Well-to-wheels emissions, costs, and feedstock potentials for light-duty hydrogen fuel cell vehicles in China in 2017 and 2030.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 110477, 2020.

KUMAR, S. Shiva; HIMABINDU, V. **Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review.** **Materials Science for Energy Technologies**, v. 2, n. 3, p. 442-454, 2019.

LAGO, S. M. S.; DELABENETA, C. a Produção Científica Brasileira Sobre Energia Solar Fotovoltaica No Período De 2007 a 2017. **Revista de Administração de Roraima - RARR**, v. 8, n. 2, p. 416, 2018.

LANA, Luana Teixeira Costa et al. **Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica.** Engenharias On-line, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.

LEITE, Izabele; MARCONE, Marcos; PAIVA, Fábio. **UM BREVE ESTUDO SOBRE OS ALGORITMOS DOS VAGA-LUMES E DOS MORCEGOS PARA OTIMIZAÇÃO DE FUNÇÕES DE REFERÊNCIA.** HOLOS, v. 4, p. 190-206, 2018.

LI, Jie et al. **Prediction of I–V Characteristic Curve for Photovoltaic Modules Based on Convolutional Neural Network.** **Sensors**, v. 20, n. 7, p. 2119, 2020.

LIN, Yuping et al. **Charging network planning for electric bus cities: a case study of Shenzhen, China.** Sustainability, v. 11, n. 17, p. 4713, 2019.

LONG, Wen et al. **A new hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and cuckoo search for parameter extraction of solar photovoltaic models.** *Energy Conversion and Management*, v. 203, p. 112243, 2020.

LOPES FILHO, Gilberto; FRANCO, Ricardo Augusto Pereira; VIEIRA, Flávio Henrique Teles. **ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O ALGORITMO FIREFLY COM ATUALIZAÇÃO EM FUNÇÃO DA IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA.** In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018.

MA, R. et al. **Adding a Third Component with Reduced Miscibility and Higher LUMO Level Enables Efficient Ternary Organic Solar Cells.** *ACS Energy Letters*, v. 5, n. 8, p. 2711–2720, 2020.

MANAI, Lazhar; ARMI, Faouzi; BESBES, Mongi. **Flying capacitor multilevel inverter control considering lower order harmonics elimination based on Newton-Raphson algorithm.** *Electric Power Components and Systems*, v. 45, n. 17, p. 1918-1928, 2017.

MARTIN, Aranzazu D. et al. **Centralized MPPT Controller System of PV Modules by a Wireless Sensor Network.** *IEEE Access*, v. 8, p. 71694-71707, 2020.

MENEZES, Sandro Loiola; FREITAS, Rebeca Schroeder; PARPINELLI, Rafael Stubs. **Mineração em grandes massas de dados utilizando hadoop mapreduce e algoritmos bio-inspirados: Uma revisao sistemática.** *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, v. 23, n. 1, p. 69-101, 2016.

MORAIS, L. Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras. *Aleph*, p. 127 p., 2015.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; DE RESENDE, L. M. M. **Advances in the composition of Methodi Ordinatio for systematic literature review.** *Ciência da Informação*, v. 46, n. 2, p. 161-187, 2017.

PENNA, Anthony N.. **A History of Energy Flows: from human labor to renewable power.** New York: Routledge, 2020.

PINTO, Cláudia Sofia Benvindo Soares. **Validação Experimental do Modelo Cinco Parâmetros e Um Díodo de Painéis Fotovoltaicos.** 2016. 72 f. 2016. Tese de Doutorado. Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico Lisboa, Lisboa.

RAVINDRA, Kollu; SULTHANA, S. M. **Comparative Study of Parameter Estimation Methods for a Single Diode PV Module.** In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Microelectronics, Computing and Communication Systems.* Springer, Singapore. p. 709-719.

RODRIGUES, R et al. **As Células De Combustível De Hidrogênio : Suas Aplicações No Sistema Energético Global Em Equilíbrio Com O Meio Ambiente Hydrogen Fuel Cells : Its Applications in the Global Energy System in Balance With the Environment.** p. 15–28, 2019.

SOARES, Thiago Costa; CUNHA, Dênis Antônio da. **Emissões de gases de efeito estufa e eficiência ambiental no Brasil.** *Nova Economia*, v. 29, n. 2, p. 429-458, 2019.

TANG, Jie et al. **Economic analysis of photovoltaic electricity supply for an electric vehicle fleet in Shenzhen, China.** *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 8, n. 3, p. 202-224, 2014.

WAHID, Fazli; GHAZALI, Rozaida; ISMAIL, Lokman Hakim. **Improved firefly algorithm based on genetic algorithm operators for energy efficiency in smart buildings**. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 44, n. 4, p. 4027-4047, 2019.

WANG, Henry K. H.. **Renewable Energy Management in Emerging Economies Strategies for Growth**. New York: Routledge, 2020.