

MÉTODOS DE PREVISÃO SOLAR INTRA-HORA – UMA REVISÃO DA LITERATURA

Matheus José de Carvalho – matheusjcarvalho@gmail.com

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Energia e Ambiente

Darío Gerardo Fantini

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Energia e Ambiente

Mário Benjamim Baptista de Siqueira

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Energia e Ambiente

1. Radiação Solar. 1.1. Recurso solar e meteorologia da radiação solar.

Resumo. *As tecnologias de geração de energia solar, como os sistemas fotovoltaicos e concentradores de energia solar, dependem quase que exclusivamente da incidência direta da radiação solar. Esse recurso, visto da superfície da Terra, possui uma variação conforme condições de sombreamento por nuvens. As nuvens são capazes de baixar drasticamente em poucos minutos a radiação solar direta, assim trazendo variações abruptas não planejadas na geração e distribuição de energia. Sendo assim, para inserir cada vez mais essas tecnologias às redes de distribuição, torna-se necessário prever interrupções de geração de energia provenientes de sombreamentos, para que outro sistema de geração de energia, que não dependa exclusivamente da irradiação solar direta, seja iniciado. O intuito deste trabalho foi desenvolver inicialmente uma revisão sistemática da bibliografia e uma análise bibliométrica sobre previsão solar de curto prazo, a partir de artigos presentes nas bases de dados da Scopus e Web of Science. Foi utilizada uma combinação de palavras-chave, de forma a conhecer os principais métodos que vem sendo discutidos, os principais pesquisadores da área, onde essas pesquisas estão sendo desenvolvidas e a que ponto estão as pesquisas em relação as previsões. Por fim, foi feita uma busca em bases de dados de publicações nacionais, com o intuito de enfatizar alguns dos principais trabalhos desenvolvidos neste tema em questão no Brasil.*

Palavras-chave: *Previsão solar de curto prazo; Energia fotovoltaica; Previsão solar intra-hora.*

1. INTRODUÇÃO

A alvorada da transição dos métodos de produção energética entre os de elevada emissão e não renováveis, para métodos que favorecem mais o ambiente já se iniciou. Devido à crescente demanda mundial por energia elétrica, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e a preocupação com o ambiente juntamente com os impactos dos últimos anos, originou essa busca por outros meios de geração de energia elétrica, estipulando metas, criando incentivos, novas práticas, e até mesmo iniciativas de uso consciente e econômico de combustíveis fósseis (Abuella, M, 2015).

Meios de conversão de energia, considerados limpos e renováveis, estão sendo utilizados cada vez mais. No entanto, sabendo que ainda essa fase encontra-se no prelúdio, as resoluções de grandes desafios devem ser obtidas para possibilitar a inserção consciente dessa nova onda de energia limpa e renovável que o mundo vem instalando. Problemas como controle, rendimento e custo, são os mais relevantes para a substituição de um método já em uso por outra nova tecnologia, pois são fatores que geram impacto direto na economia. Dentre as tecnologias contemporâneas, em particular a energia fotovoltaica e a eólica, possuem um desafio relevante em relação ao controle da produção energética, ambas dependem das condições meteorológicas dos locais a serem instaladas. De início, a utilização de energia eólica ou solar possui uma perspectiva favorável por se tratar de fontes de custo zero e por sua abundância, porém são fontes com comportamento estocástico e intermitentes, ou seja, sua variabilidade é a maior dificuldade para a integração das mesmas nas redes de distribuição (Monteiro, 2010).

A energia eólica varia conforme a intensidade dos ventos e a energia solar conforme a taxa de radiação solar a nível do solo, podendo variar devido à presença de nuvens e da rotação da Terra. Essa geração inconstante de energia gera um grave problema para as redes de distribuição, considerando que a distribuição de energia trabalha em um balanço de equilíbrio de demanda e oferta, ao faltar produção de energia devido às condições climáticas, ocasiona-se a ruptura desse equilíbrio (David, 2016)(Dualbase, 2021).

É inevitável a necessidade da inserção de energias renováveis na matriz energética global, em especial a crescente utilização de energia solar. As tecnologias de geração de energia solar já presentes no mercado possuem preços que se aproximam com o custo da energia proveniente da rede de distribuição em algumas regiões, e conseqüentemente, está trazendo cada vez mais o interesse na utilização da energia solar para a geração de energia. Logo, torna-se extremamente necessário estudar o problema da gestão de intermitência do fornecimento dessa fonte energética. Na Espanha, como em

alguns outros mercados de fornecimento de eletricidade, para poder abastecer a rede de distribuição de energia como energia proveniente do sol, é necessário apresentar a previsão de geração de eletricidade da fonte geradora (Kraas, 2013).

Este trabalho apresenta uma análise bibliométrica e uma revisão bibliográfica sobre previsão solar no intervalo de uma hora. Aqui expõe-se algumas das principais publicações já feitas nos diferentes métodos, relaciona-se os principais pesquisadores neste tema, ilustra-se uma linha temporal de quantidade de artigos relacionados ao tema que vem sendo publicados, dentre outras informações pertinentes à uma análise bibliométrica. Este artigo traz inicialmente 1. Introdução, seguido de 2. Desenvolvimento e 3. Conclusão. O 2. Desenvolvimento está dividido em: 2.1 Coleta de dados, 2.2 Seleção de dados, 2.3 Análise bibliométrica 2.4 Método de sensoriamento local, 2.5 Método de persistência e *smart-persistence* 2.6 Métodos com redes neurais artificiais e inteligência artificial, 2.7 Modelos híbridos e 2.8 Trabalhos desenvolvidos no Brasil.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Coleta de dados

Os artigos utilizados para a análise aqui proposta, foram extraídos das plataformas de base de dados *Scopus* e *Web of Science*. Ambas as plataformas são referências nesta área de pesquisa abordada, pela quantidade constituinte de trabalhos relevantes presentes nas mesmas e suas frequentes atualizações. Nessas plataformas é possível obter acesso a publicações em revistas mais importantes, cujo o foco seja a engenharia empenhada em estudo da energia voltada para o meio ambiente.

Para obter êxito em refinar a pesquisa dos artigos relacionados à área de pesquisa, foi desenvolvido uma combinação de palavras-chave. A combinação foi utilizada em ambas as plataformas de base de dados, dada por: ("*Solar* Forecast**" OR "*solar* irradia* forecast**" OR "*intra-hour forecas**") AND ("*sky camera**" OR "*sky imag**") AND ("*very-short*" OR "*ultra-short*" OR "*short-term*" OR "*in-tra-hour*"). Como resultado, desconsiderando os duplicados, foram ao todo 67 artigos encontrados.

Afim de enfatizar trabalhos desenvolvidos no Brasil, visto que a pesquisa nas bases *Scopus* e *Web of Science* trouxe apenas uma publicação brasileira, então foi feita uma pesquisa no ambiente Google Acadêmico por meio de palavras-chave pertinente ao tema.

2.2 Seleção de dados

Para análise dos artigos, foram selecionados os mais relevantes em termos de quantidade de citações para cada método de previsão de radiação solar.

2.3 Análise bibliométrica

Com o objetivo de uma melhor elucidação sobre os artigos selecionados para o desenvolvimento deste trabalho, observou-se a necessidade do desenvolvimento de uma análise bibliométrica. Nesta análise foi possível verificar quais são os pesquisadores de maior quantidade de publicação, quais os trabalhos mais relevantes a partir da quantidade de citações, onde internacionalmente estão sendo desenvolvidas pesquisas nesta área foco e em quais países estão as maiores quantidades de publicações. Por fim, também foi analisado quais são as revistas com a maior quantidade de artigos sobre esse tema, e a interligação das produções científicas entre os autores por meio do *software Vosviewer*.

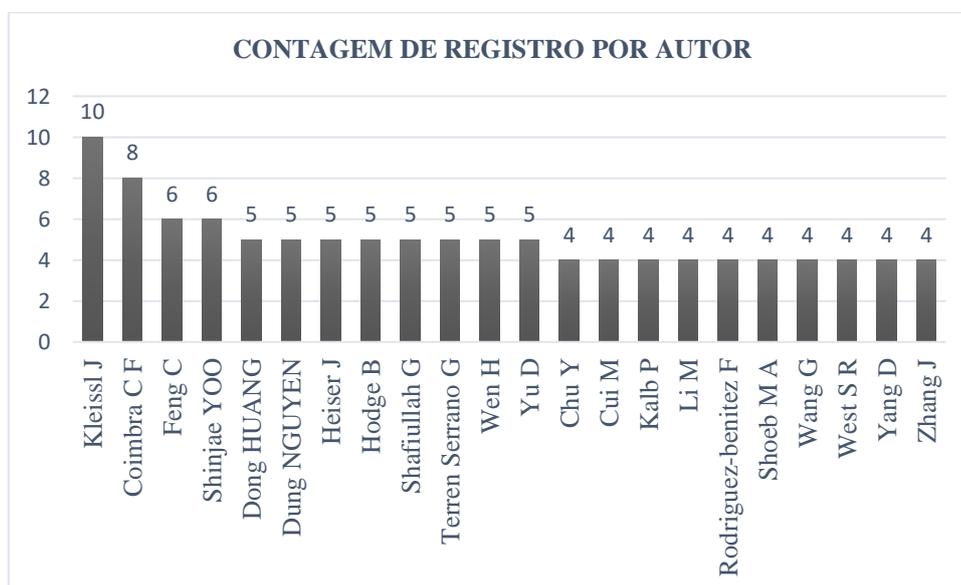


Figura 1 - Contagem de registros publicados dos principais autores segundo pesquisa levantada.

Inicialmente, a contagem de registro mostrou, conforme o gráfico da Fig. 1, que Kleissl J. e Coimbra C. F. possuem a maior quantidade de publicações na área específica de previsão solar de muito curto espaço de tempo e curto espaço de tempo, com um total de 10 e 8 registros respectivamente. Juntos seus trabalhos possuem um total de 406 citações, sendo o artigo mais citado de Kleissl é o intitulado *Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers*, citado 35 vezes, e o de Coimbra, *Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis*, citado 223 vezes, sendo este o artigo mais vezes citado dentre os relacionados nesta pesquisa, dados estes podendo ser verificados na Tab. 1. Outros autores com expressividade em publicações também, Feng C e Shinjae Yoo, com uma contagem de 6 registros cada, sendo Feng C. tendo seus trabalhos citados 41 vezes, e Shinjae Yoo 84 vezes, e seu artigo *3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers*, é o segundo mais vezes citado, com um total de 79 vezes.

Seguindo a análise, foi verificado quais países de origem dos trabalhos. Conforme a Fig. 2, pode-se verificar que os Estados Unidos e China são os países de origem onde mais publicaram sobre o assunto, sendo 30 e 19 registros respectivamente. Na Europa, esse tema já tem se espalhado em vários países, principalmente na Espanha, Reino Unido, Inglaterra e Alemanha, juntos com um total de 13 publicações. Os artigos aqui antes mencionados, de Kleissl, Coimbra e Shinjae Yoo, são todos dos norte americanos. Dos 10 artigos mais citados, 4 são dos Estados Unidos, os outros 6 são de Singapura, Austrália, Alemanha, Inglaterra e China. Na América do Sul apenas duas publicações, uma no Brasil e outra no Uruguai.

Tabela 1 - Os 10 artigos mais vezes citados e seus respectivos autores segundo pesquisa levantada.

Autores	Título do Artigo	Vezes Citados
Marquez, Ricardo; Coimbra, Carlos F. M.	Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis	223
Peng, Zhenzhou; Yu, Dantong; Huang, Dong; Heiser, John; Yoo, Shinjae; Kalb, Paul	3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers	79
Wang, Fei; Zhen, Zhao; Liu, Chun; Mi, Zengqiang; Hodge, Sri - Mathias; Shafie-khah, Miadreza; Catalao, Joao P. S.	Image phase shift invariance based cloud motion displacement vector calculation method for ultra-short-term solar PV power forecasting	61
Aryaputera, Aloysius W.; Yang, Dazhi; Zhao, Lu; Walsh, Wilfred M.	Very short-term irradiance forecasting at unobserved locations using spatio-temporal kriging	57
Mahdavi, Nariman; Braslavsky, Julio H.; Seron, Maria M.; West, Samuel R.	Model Predictive Control of Distributed Air-Conditioning Loads to Compensate Fluctuations in Solar Power	56
West, Samuel R.; Rowe, Daniel; Sayeef, Saad; Berry, Adam	Short-term irradiance forecasting using skycams: Motivation and development	56
Bernecker, David; Riess, Christian; Angelopoulou, Elli; Hornegger, Joachim	Continuous short-term irradiance forecasts using sky images	45
Chen, Xiaoyang; Du, Yang; Wen, Huiqing; Jiang, Lin; Xiao, Weidong	Forecasting-Based Power Ramp-Rate Control Strategies for Utility-Scale PV Systems	38
Dung (Andu) Nguyen; Kleissl, Jan	Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers	35
Bright, Jamie M.; Killinger, Sven; Lingfors, David; Engerer, Nicholas A.	Improved satellite-derived PV power nowcasting using real-time power data from reference PV systems	34
Scolari, Enrica; Sossan, Fabrizio; Paolone, Mario	Irradiance prediction intervals for PV stochastic generation in microgrid applications	34

Dentre os artigos pesquisados, foram levantados os periódicos mais significativos neste tema em questão, ao todo foram identificadas 43 periódicos e conforme a Tabela 2, é possível verificar o quanto o periódico *Solar Energy* se destaca em relação aos outros *journals*. São 16 publicações ao todo, e o segundo, *Renewable Energy* com 4 publicações. O periódico *Solar Energy* já era esperado como principal, pois é referência por se tratar do periódico oficial da sociedade internacional de energia solar. Segundo dados tirados na página da *Elsevier*, o fator de impacto do periódico *Solar Energy* é 5.742, assim sendo classificado em 38 de 114 em Energia e Combustíveis (*Elsevier*, 2021).

Ressalta-se que foi necessário verificar a quanto tempo o assunto aqui tratado vem sendo publicado e em conjunto, a sua periodicidade de publicações ao passar dos anos até os dias atuais. Conforme a Figura 3, é possível perceber que esse tema vem sendo publicado há menos de 10 anos, e de 2018 até os dias atuais houve um crescente significativo.

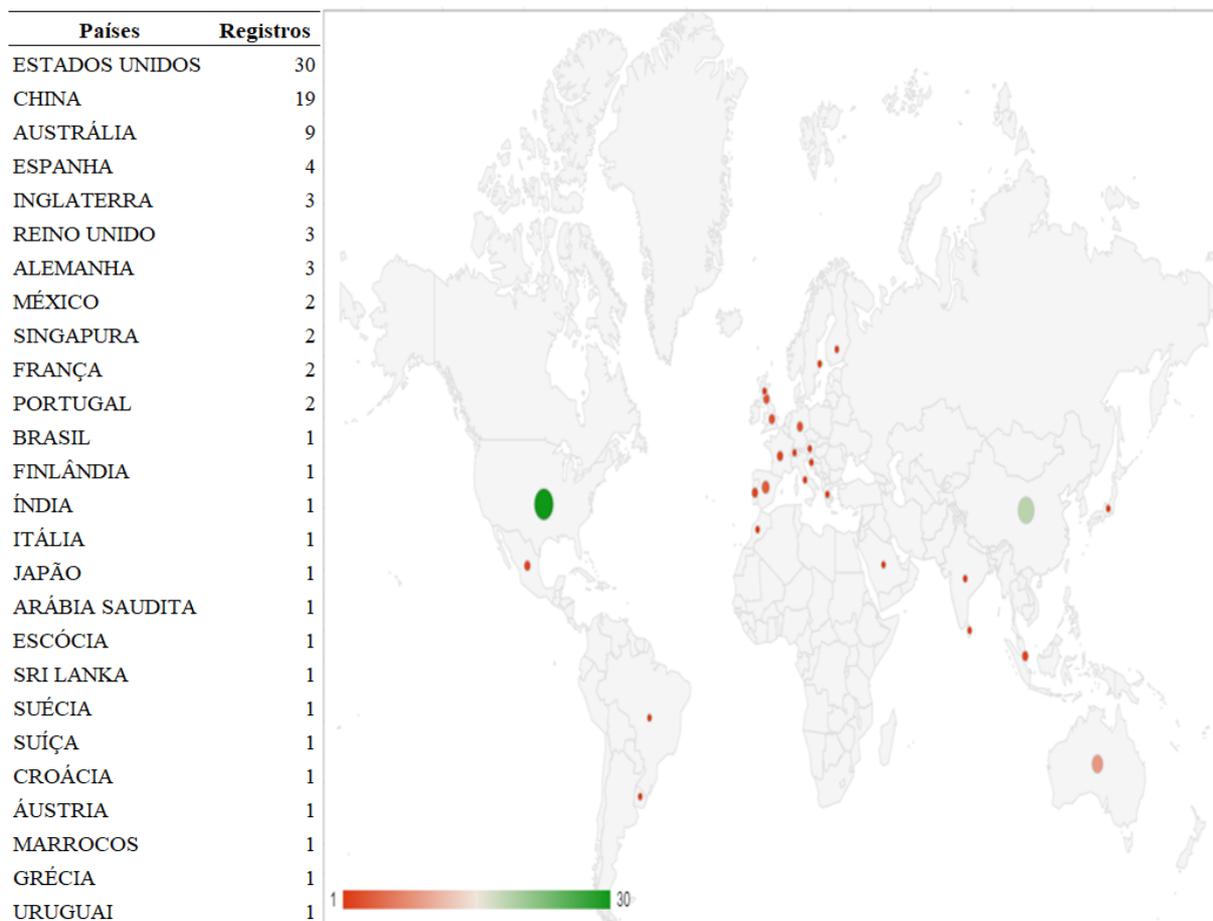


Figura 2 - Registro de publicações por países

Por fim, foram verificadas as conexões entre os autores. Com essas conexões é possível distinguir os principais autores em cada linha de pesquisa. Como o tema de previsão solar se divide em diferentes métodos aplicados para fazer a previsão, conseqüentemente espera-se vários núcleos espalhados de arranjos de autores, e foi o que o primeiro gráfico obtido no *software Vosviewer* nos trouxe, como pode ser visto no gráfico da Figura 4. Neste gráfico da Figura 4 foram considerados todos os 210 autores sem a necessidade de múltiplos trabalhos e também foi desconsiderado a necessidade de haver citações. É possível observar que a maioria dos núcleos de autores não possui grandes conexões, encontram-se dispersos, não obstante, é possível observar 4 núcleos que possuem mais conexões, conseqüentemente são grupos com autores mais citados e com maior quantidade de trabalhos publicados. O gráfico da Figura 5 apresenta a maior conexão fornecida pelo *software Vosviewer*, são ao todo 26 autores do total de 210, onde notoriamente é possível observar a relevância dos trabalhos de Kleissl, e neste caso também vale citar a relevância de Urquhart no centro, com várias conexões.

Tabela 2 - Registo de quantidade de artigos por revista.

Periódico	Registros
SOLAR ENERGY	16
RENEWABLE ENERGY	4
AIP CONFERENCE PROCEEDINGS	2
ENERGIES	2
IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS	2
REMOTE SENSING	2
METEOROLOGISCHE ZEITSCHRIFT	2
WREF 2012	2

A análise desenvolvida na parte de bibliometria, trouxe um apontamento dos principais autores e principais trabalhos que estão sendo discutidos e utilizados como base de desenvolvimento de pesquisa. Esse direcionamento é relevante para o conhecimento geral e pode trazer desde o âmbito geral para aquele mais específico, pontualmente os temas mais pesquisados, as questões que já vêm sendo desenvolvidas, suas problemáticas, quanto tempo esse assunto vem sendo pesquisado, e como está a conectividade entre os autores e a dispersão do tema, em termos de publicação ao redor do mundo.

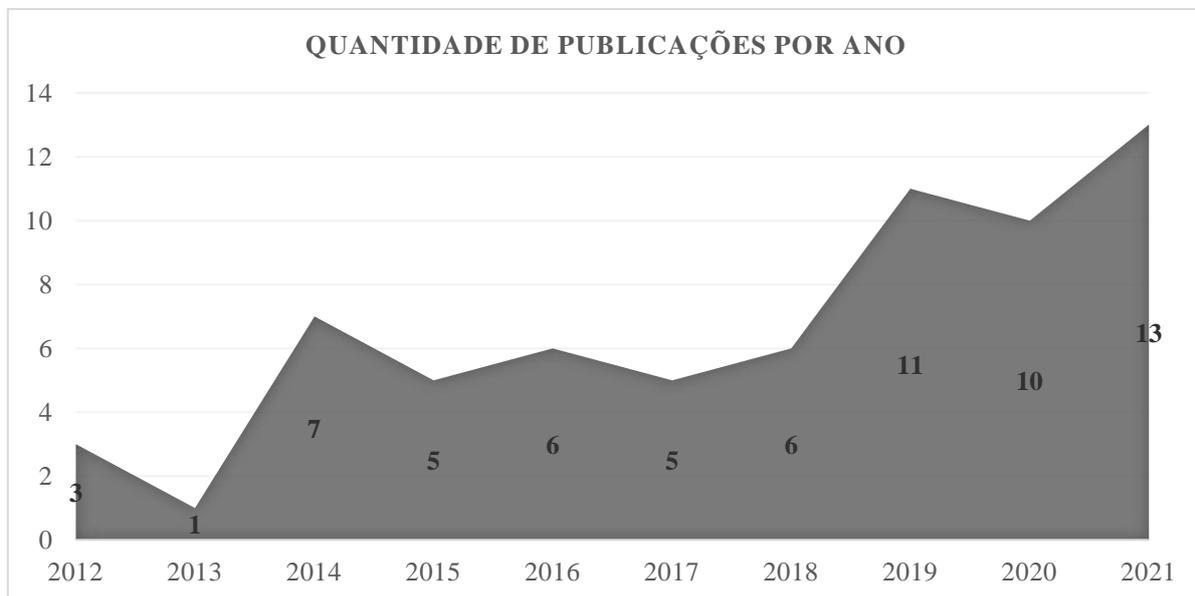


Figura 3 – Gráfico de quantidade de publicações de 2012 a 2020.

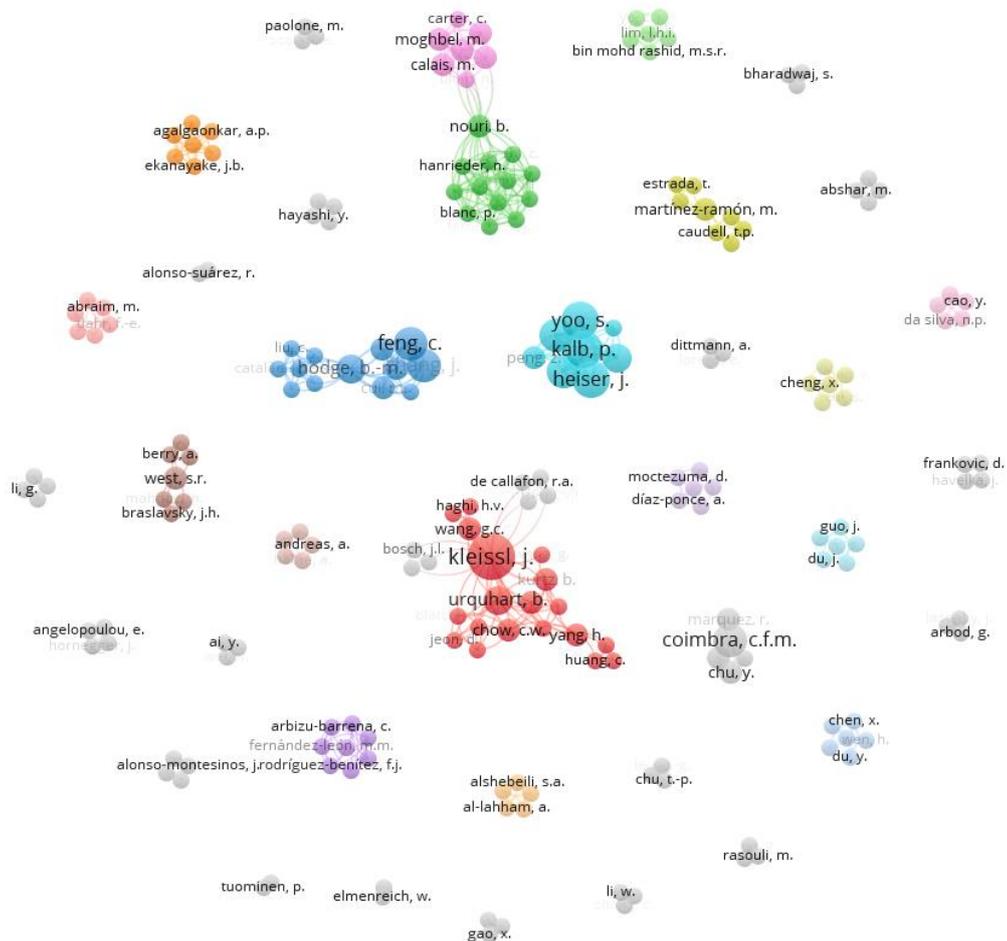


Figura 4 – Conexões entre os 210 autores dos artigos pesquisados.

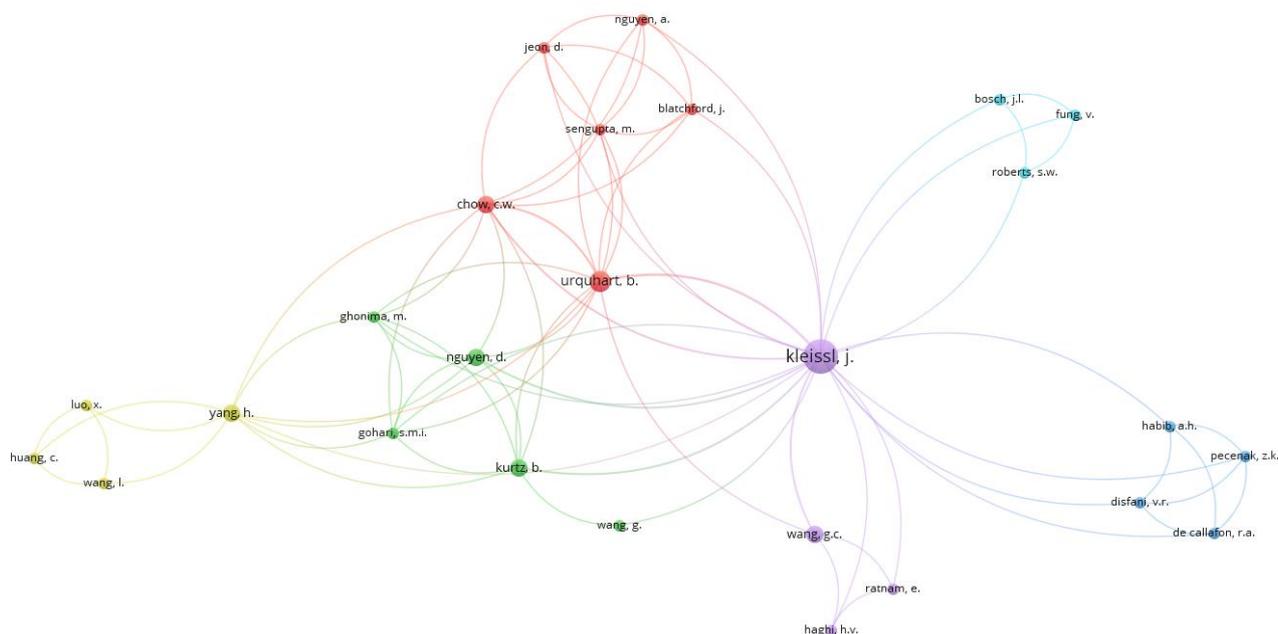


Figura 5 – Maior conexão dentre os artigos pesquisados. São ao todo 26 autores

2.4 Método de sensoriamento local

O método de sensoriamento local é baseado em tratamento de imagens de céu, fornecidas por um gerador de imagens também conhecido como *Total Sky Imager* (TSI). O TSI normalmente é instalado na região onde se deseja fazer a análise, essas imagens possuem ângulos de aproximadamente 180°. Esse método apresenta imagens de nuvens com elevada resolução, temporal e espacial comparado com métodos de imagens de satélite (Kasten, 1980).

A utilização do método em que se faz uso de TSI tem crescido, com resultados promissores. Para utilizar um TSI, é necessário o investimento de um valor elevado, porém podem ser substituídos por câmeras de segurança, as quais possuem um menor valor e se acoplado às necessidades, como recursos de processamento gráfico, trazem resultados satisfatórios comparados ao TSI. Este equipamento possui um algoritmo em que detecta nuvens em diferentes densidades, porém não produz classificações, altura, direção de propagação e velocidade das nuvens, logo, apresenta oportunidade de desenvolvimento de algoritmos complementares para suprir essas necessidades melhorando assim a qualidade das previsões.

As características desse método são bastante próximas das características dos métodos de tratamento de imagens de satélite, porém, este caso é utilizado apenas para previsões de curto horizonte, ou seja, para alguns minutos, no máximo uma hora, por fazerem previsões apenas no tempo em que as nuvens estiverem no campo de visão do TSI. Os horizontes de previsão variam dependendo da posição e velocidade das nuvens (Kraas, 2013). Este método trata-se de monitoramentos localizado e opera em horizontes muito curtos, caracterizado pelo tempo em que a nuvem passa pelo campo de visão da câmera, podendo ou não passar pela “zona de perigo”. Essa zona é onde a nuvem intercepta o trajeto da radiação solar direta no local de interesse. O tempo em que a nuvem leva para passar por todo o campo de visão da câmera comumente tem ordem máxima de vinte minutos, e o sistema atualiza de dez a trinta segundos (Chow, 2012).

Marquez *et al.* (2013) desenvolveram um trabalho, até então o mais citado a partir do levantamento realizado neste presente artigo, usando o método de sensoriamento local, usando um TSI com o intuito de prever a irradiação normal direta (IND) média de 1 minuto para horizontes de tempo de 3 a 15 minutos. Obtendo o valor do desvio do erro quadrático médio, compararam como o mesmo valor obtido pelo método de persistência. Como resultado, definiram que analisando os erros RMSE, as imagens do céu são úteis para horizontes de previsão de 3 a 15 minutos à frente, e ao comparar como modelo de persistência, o modelo de imagem são mais precisos 5 minutos à frente.

Outro trabalho utilizando este método, foi o de Peng *et al.* (2015) os mesmos propuseram em seu trabalho acrescentar um método de classificação de nuvens e a altura das mesmas com a utilização das imagens de vários TSIs. Como resultado, verificaram que foi possível classificar as nuvens e detectar camadas e por fim, aplicaram a pesquisa em uma fazenda de energia solar de 36 megawatts e compararam o resultado com o método de persistência, como resultado obtiveram melhoria de 26% em todas as previsões entre 1 a 15 minutos. Em 2013, Bosch *et al.*, publicaram um método para derivar

a velocidade das nuvens por sensores. Foram instalados sensores em uma planta de geração de energia fotovoltaica e durante um ano foi feito o monitoramento. Com correlação cruzada entre a previsão e a energia realmente gerada, concluiu-se que as estações são efeitos que provocam uma variação elevada nos resultados e que os erros foram inferiores a 1% o RMSE do ano foi de 20,9%.

2.5 Método de persistência e *smart-persistence*

Os métodos de persistência, considerados modelos de previsão de energia solar mais simples, assim como o modelo de índice de céu limpo, são utilizados como base comparativa para outros modelos mais complexos, com o cálculo do erro de outros métodos de previsão solar, permitindo uma comparação entre eles (Marquez, 2013). São previsões para um único ponto, e que consiste em dizer que a condição momentânea de céu limpo irá permanecer durante um dado intervalo de tempo. Esse índice de céu limpo mantido em persistência pode variar seus valores analisados em momentos diferentes. A precisão desse método diminui muito com o aumento do período de previsão, exatamente por considerar um único índice de céu limpo, sabendo que é variável no intervalo de tempo analisado (Inman, 2013) (Diagne, 2013) (Pelland, 2013). A principal característica destes modelos de persistência é vista que, para condições de céu sem sombreamento, ou seja, sem a presença de nuvens, os seus resultados são satisfatórios (Inman, 2013). Através de uma melhoria no modelo de persistência, é obtido o novo modelo denominado modelo de persistência inteligente. Esta melhoria consiste em usar o valor médio do índice de céu claro. Um modelo de persistência adequadamente definido produz previsões muito precisas na previsão solar de curtíssimo e curto prazo quando a variabilidade da irradiação horizontal global (GHI) é baixa, portanto, qualquer outro modelo de previsão que apresente uma melhoria sobre este, como consequência, melhorará a estimativa em relação a uma irradiação de alta variabilidade aleatória e, portanto, frequentemente servirá como a linha de base para avaliar os modelos de previsão (Marquez, 2013) (Kumler, 2019).

Kumler *et al.* (2019) desenvolveram um modelo utilizando o método de persistência inteligente, baseado em física com o intervalo de previsão em uma hora de radiação solar (PSPI), e desenvolvem uma técnica de rastreamento de nuvem. Nesse modelo em questão, os autores calculam a radiação solar extraterrestre e o ângulo zenital com o Algoritmo de Posição Solar (SPA), do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL). Os autores comparam seu novo algoritmo considerando PSPI, com o modelo de persistência inteligente e de persistência, em horizontes de previsão entre 5 e 60 minutos, e como resultado, verificaram um desempenho superior para o PSPI em relação aos outros modelos.

2.6 Métodos com redes neurais artificiais e inteligência artificial

Os modelos baseados em redes neurais artificiais (RNA) e em inteligência artificial (IA), são modelos que utilizam programas que se adaptam a partir de inserções de novos dados, ou seja, os algoritmos desses programas aprendem e modificam com as variações climáticas. São programas baseados em organismos vivos, como as redes neurais e podem ser aplicados utilizando imagens de satélites com intervalos de tempo inferiores a seis horas, e também como imagens totais do céu (Inman, 2013)(Diagne, 2013). Esse modelo utiliza um banco de dados pré-programado de informações climáticas passadas, comparando com as informações obtidas no momento, trazendo assim as previsões (Inman, 2013). Dois conceitos que aparecem dentro da IA e que são baseados na RNA são *machine learning* e *deep learning*, ambos podem ser classificados em aprendizado supervisionado e não supervisionado (Richardson, 2017)(Voyant, 2017). As RNAs são compostas pela camada de entrada, a camada de saída e aquelas definidas entre essas duas, que são camadas ocultas e que podem ser mais de uma. Essas camadas são compostas por neurônios que são os elementos básicos do processamento, cada camada pode assumir centenas deles. Em uma camada oculta, cada neurônio soma as saídas ponderadas da camada anterior e adiciona uma inclinação à soma. Em seguida, a soma é processada por uma função chamada função de ativação para gerar saídas, que são utilizadas como entradas para os neurônios da próxima camada. Vale ressaltar que existem vários tipos de funções de ativação dependendo do tipo de problema a ser resolvido (Chu, 2015).

Uma outra pesquisa baseada em RNA foi publicada por Sivaneasan *et al.* (2017), onde eles fizeram uma comparação entre modelos básicos de RNA com inserção de RNA-fuzzy e RNA-fuzzy com fator de correção de erros em relação a um método desenvolvido por eles, onde utilizam uma RNA em uma *Back Propagation* de tripla camada e o uso também de pré-processamento difuso para previsão de energia solar. Como resultado, conseguiram um desempenho superior. Como resultado numérico, eles conseguiram demonstrar que o fator de correção de erro acoplado a uma RNA pura pode melhorar significativamente a precisão da previsão de irradiação solar devido à capacidade de correção de erros adaptativa. Os mesmos constataram uma outra forma de aprimorar a precisão, que é através da incorporação de um pré-processamento de lógica difusa para classificar o índice de cobertura de nuvens, incorporando os dados de hora do dia, umidade relativa e precipitação. Pedro *et al.* (2015) mostraram um modelo de previsão solar intra-hora GHI e DNI baseado no reconhecimento de padrões otimizados de medições meteorológicas locais e imagens do céu, usando k-vizinhos mais próximos, concluindo que a inclusão de imagens do céu no modelo apresenta apenas uma pequena melhoria (menos de 5%) em relação ao modelo k-vizinhos mais próximos (kNN) sem imagens. No entanto, para o caso de DNI, ajuda a definir os intervalos de incerteza. Castillejo *et al.* (2021), publicaram um trabalho de previsão de irradiação solar envolvendo métodos estatísticos de previsão solar e IA. Esse novo método aplicado pelos autores considera classificação de padrões de irradiância, cadeias de Markov lógica fuzzy, utilizando uma abordagem operacional. O método foi aplicado por seis anos, onde não utilizaram dados prévios por não existirem com um *lead time* de 0-2 horas. Como conclusão, esse método desenvolvido comparado com o de persistência inteligente foi consistentemente superior devido às relações das séries

temporais, trazendo uma eficiência superior cerca de 10% para índice de céu claro. Um dos problemas encontrados e que ocasionou alguns erros refere-se a mudanças nas condições atmosféricas entre o pôr do sol e o nascer do sol que não podem ser previstas uma vez que os dados solares não estão disponíveis, pois é baseado no estado atmosférico anterior.

2.7 Modelos híbridos

Os modelos híbridos são basicamente os que correlacionam mais de um modelo de previsão de radiação solar. Sabendo que os modelos relacionados anteriormente possuem limitações, alguns pesquisadores fizeram a utilização de mais de um método, suprindo a baixa eficiência que um modelo possui com outro modelo que possui elevada eficiência onde deseja ser aperfeiçoado.

Ghayekhloo *et al.* (2015), desenvolveram um trabalho onde utilizaram modelos híbridos com a utilização da teoria dos jogos. Eles fizeram previsões de uma a três horas de radiação solar com o método de redes neurais bayesianas e para avaliar a precisão dos métodos, utilizaram dados históricos de radiação solar. Os autores concluíram que ao utilizar a teoria dos jogos, o método híbrido proposto, ao comparar com técnicas como o de persistência, obtiveram uma maior precisão de previsão. Outra pesquisa relevante sobre a aplicação do modelo híbrido foi o de Singla *et al.* (2021), eles concluíram que os modelos híbridos têm um desempenho melhor do que os modelos individuais. No entanto, os modelos híbridos são estruturas mais complexas baseadas em modelos de aprendizagem profunda e de máquina de rede neural recorrente (RNN), rede neural de convolução (CNN), memória de curto prazo longa (LSTM) e máquina de aprendizagem extrema (ELM) também levam vantagem dos algoritmos de otimização como otimização por enxame de partículas (PSO), algoritmo genético (GA) e *firefly*.

2.8 Trabalhos desenvolvidos no Brasil

No Brasil, as publicações de trabalhos voltadas a previsão solar intra-hora estão em desenvolvimento, tornando-se assim de relativa dificuldade de localização. Como forma de atestar isso, na análise bibliométrica deste trabalho foi possível verificar apenas um trabalho brasileiro. Por outro lado, várias instituições nacionais desenvolvedoras de pesquisa, como a UnB, UFPA, UFSC e UFSCar, já desenvolvem trabalhos nesta área. Dentre as publicações brasileiras, Mendonça de Paiva *et al.* (2020) desenvolveram uma pesquisa avaliando dois algoritmos de aprendizagem de máquina, o MGGP e outro classificado como caixa branca, para previsão de radiação solar em um horizonte de 15 a 120 minutos. Puderam constatar que o uso de variáveis meteorológicas adicionais melhora a previsão em cerca de 5,68% para MAE e 3,41% em RMSE. Os autores aplicaram os algoritmos em seis diferentes localidades de três países. Para previsões únicas e de 90 a 120 minutos, o MGGP trouxe resultados mais precisos, porém utilizando os dois métodos em conjunto, as previsões foram significativamente melhores. Outro ponto ressaltado foi que ambos os métodos trouxeram resultados satisfatórios em relação a outros métodos aplicados anteriormente nas regiões de estudo, e o fator localidade mostrou interferir na predominância do método a ser utilizado. Outra pesquisa sobre o tema foi de Mendes *et al.* (2017), onde propuseram a aplicação de RNA do tipo *Multilayer Perceptron* utilizando o *software* Matlab para previsão de radiação solar global em curto espaço temporal, os dados utilizados foram do SONDA. Foram quantificados dados de dois dias específicos, 08 e 26 de agosto de 2016, onde observaram para os respectivos dias o resultado do MAPE 17,83% e 12,19%, de MAE de MAE 21,34 (W/m²) e 18,69 (W/m²) e REMQP 8,38% e 5,37%. Seus resultados mais satisfatórios foram com a configuração de 10 neurônios na camada intermediária. Heinen (2018) propôs uma comparação entre o método de redes neurais recorrentes, *XGBoost* e o de persistência pra previsões de radiação solar intra-hora e média diária. Para previsões intra-hora, o modelo *XGBoost*, em comparação ao de RNNs, obteve os melhores resultados com nRMSE de 12,9% em resoluções de 5 minutos.

3. CONCLUSÃO

Com este estudo foi possível verificar a deficiência em relação à avaliação da eficiência dos métodos de previsão solar aqui estudados. Em sua grande maioria, a avaliação de eficiência é de forma comparativa com o método de persistência. Consequentemente, não são capazes de quantificar a precisão e exatidão do sistema em termos absolutos. Foi possível entender também que a hibridização dos métodos, principalmente com a inserção em conjunto dos métodos de RNA e IA, estão cada vez mais frequentes atualmente, e requerem uma análise mais detalhada sobre a validação da eficiência. Sobre a revisão bibliométrica, foi possível verificar que a previsão solar em curto espaço de tempo é um tema muito atual, considerando que a primeira publicação encontrada a partir das palavras-chave usadas foi em 2012. Verificou-se que Estados Unidos e China são os países onde se encontra maior quantidade de publicações neste tema. A análise sobre publicações por países evidenciou-se também que o tema já está se espalhando pela Europa, isso tudo indica que os estudos nessa área ainda estão no início do desenvolvimento. Ao desenvolver este trabalho foi possível perceber que pesquisas voltadas à previsão de radiação solar intra-hora no Brasil encontram-se em fase de desenvolvimento, visto a dificuldade de encontrar uma grande quantidade de trabalho; por outro lado, foi possível identificar várias instituições que estão desenvolvendo pesquisas nessa área, trazendo assim uma perspectiva de crescimento no desenvolvimento deste tema no Brasil. Como trabalho futuro, pretendemos desenvolver uma análise mais específica sobre os resultados das pesquisas que aplicaram os métodos híbridos, com aplicação dos métodos de redes neurais artificiais e inteligência artificial. Por fim, há atualmente em desenvolvimento, um trabalho de previsão solar intra-hora utilizando o método de sensoriamento local.

Agradecimentos

Agradecemos primeiramente a Deus por nos proporcionar o dom da vida e saúde, assim viabilizando inicialmente o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecemos aos nossos familiares pelo apoio total nessa nossa caminhada na área da pesquisa, e por fim, agradecemos o suporte da instituição de ensino, Universidade de Brasília, com todo seu aporte técnico disponível para nós pesquisadores.

REFERÊNCIAS

- Abuella, M., Chowdhury, B., 2015. Solar power probabilistic forecasting by using multiple linear regression analysis. In: SoutheastCon 2015. pp.1-5.
- Bosch, J. L., & Kleissl, J. 2013. Cloud motion vectors from a network of ground sensors in a solar power plant. *Solar Energy*, 95, 13-20. doi:10.1016/j.solener.2013.05.027.
- Castillejo-cuberos, A., Boland, J. & Escobar, R. 2021, "Short-term deterministic solar irradiance forecasting considering a heuristics-based, operational approach", *Energies*, vol. 14, no. 18.
- Chow, C., Urquhart, B., Lave, M., Anthony Dominguez, Jan Kleissl, Janet Shields, Byron Washom, 2012. Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed, *Solar Energy*, Volume 85, Issue 11, Pages 2881-2893.
- Chu, Y.; Li, M.; Pedro, H.T.C.; Coimbra, C.F.M. Real-time prediction intervals for intra-hour DNI forecasts. *Renew. Energy* 2015, 83, 234–244, doi:10.1016/j.renene.2015.04.022.
- David, Ramahatana, T. L., 2016. Probabilistic forecasting of the solar irradiance with recursive arma and garch models. *Solar Energy* 133, 55 - 72.
- Diagne, M., David, M., Lauret, P., Boland, J., & Schmutz, N. (2013). Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 65-76. doi:10.1016/j.rser.2013.06.042.
- DualBase, 2021 Visited in = 01/12/2021. URL <https://www.dualbase.com.br/produtos/RsensDB>.
- Elsevier, 2021 Visited in = 01/12/2021. URL <https://www.journals.elsevier.com/solar-energy>.
- Heinen, E., 2018. Redes Neurais Recorrentes e XGboost Aplicados à Previsão de Radiação Solar no Horizonte de Curto Prazo. Orientador: Ricardo A. S. Fernandes. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/11828/Disserta%20a7%20a3o%20Eduar%20Dapper%20Heinen%20-%20corrigida%2020folha%20aprova%20a7%20a3o.pdf?sequenc e=4&is Allowed=y>.
- Inman, R. H., Pedro, H. T. C., & Coimbra, C. F. M. (2013). Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(6), 535-576. doi:10.1016/j.pecs.2013.06.002.
- Kasten, F., Czeplak, G., 1980. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy* 24 (2), 177 - 189.
- Kraas, B., Schroedter-Homscheidt, M., Madlener, R., 2013. Economic merits of a state-of-the-art concentrating solar power forecasting system for participation in the Spanish electricity market. *Solar Energy* 93, 244–255.
- Kumler, A.; Xie, Y.; Zhang, Y. A Physics-based Smart Persistence model for Intra-hour forecasting of solar radiation (PSPI) using GHI measurements and a cloud retrieval technique. *Solar Energy* 2019, 177, 494–500, doi:10.1016/j.solener.2018.11.046.
- Marquez, R., & Coimbra, C. F. M. 2013. Intra-hour DNI forecasting based on cloud tracking image analysis. *Solar Energy*, 91, 327-336. doi:10.1016/j.solener.2012.09.018
- Mendes, I., Nascimento, T., Rezende, R., Silva, J., Silva, O., 2017. A utilização das redes neurais artificiais na previsão de radiação solar global. CONTECC 2017. Belém-PA, Brasil.
- Mendonça de Paiva, G.; Pires Pimentel, S.; Pinheiro Alvarenga, B.; Gonçalves Marra, E.; Mussetta, M.; Leva, S. Multiple Site Intraday Solar Irradiance Forecasting by Machine Learning Algorithms: MGPP and MLP Neural Networks. *Energies* 2020, 13, 3005. <https://doi.org/10.3390/en13113005>
- Monteiro, C., Fernandez-Jimenez, L. A., Ramirez-Rosado, I. J., Muñoz-Jimenez, A., & Lara-Santillan, P. M. (2013). Short-term forecasting models for photovoltaic plants: Analytical versus soft-computing techniques. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013 doi:10.1155/2013/767284
- Pedro, H.T.C.; Coimbra, C.F.M. Nearest-neighbor methodology for prediction of intra-hour global horizontal and direct normal irradiances. *Renew. Energy* 2015, 80, 770–782, doi:10.1016/j.renene.2015.02.061.
- Pelland, S., Remund, J., Kleissl, J., Oozeki, T., e K. De Brabandere, «Photovoltaic and Solar Forecasting: State of the Art», Int. Energy Agency Photovolt. Power Syst. Program. Rep. IEA PVPS T14, pp. 1–40, 2013.
- Peng, Z., Yu, D., Huang, D., Heiser, J., Yoo, S., & Kalb, P. 2015. 3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers. *Solar Energy*, 118, 496-519. doi:10.1016/j.solener.2015.05.037
- Richardson, W.; Krishnaswami, H.; Shephard, L.; Vega, R. Machine learning versus ray-tracing to forecast irradiance for an edge-computing SkyImager. 2017 19th Int. Conf. Intell. Syst. Appl. to Power Syst. ISAP 2017 2017, doi:10.1109/ISAP.2017.8071425.
- Singla, P.; Duhan, M.; Saroha, S. A comprehensive review and analysis of solar forecasting techniques; 2021; ISBN 1170802107227.
- Sivaneasan, B., Yu, C. Y., & Goh, K. P. (2017). Solar forecasting using ANN with fuzzy logic pre-processing. Paper

presented at the Energy Procedia, , 143 727-732. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.753

Voyant, C.; Notton, G.; Kalogirou, S.; Nivet, M.L.; Paoli, C.; Motte, F.; Fouilloy, A. Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renew. Energy* 2017, 105, 569–582, doi:10.1016/j.renene.2016.12.095.

Abstract. *Solar-radiation based generation technologies, such as photovoltaic systems and solar energy concentrators, depend heavily on the direct incidence of solar radiation. This resource, on the Earth's surface, varies according to the shading conditions by the clouds. Clouds are capable of drastically reducing direct solar irradiance in a few minutes, bringing abrupt unplanned variations in the generation, so it can experience a drastic reduction in a short period of time depending on the cloud's opacity. Therefore, in order to increasingly allow the introduction of these intermittent technologies in the electrical distribution networks, it is necessary to predict interruptions in the energy generation by cloud shading, for a better management of the network in order to bring reliability of energy distribution. The purpose of this work was to develop a systematic review of the bibliography and a bibliometric analysis on short-term solar forecasting, based on articles present in the Scopus and Web of Science databases with a combination of keywords, to know the main methods that have been discussed, the main researchers in the area, where is this research being developed and how far is the research about the predictions. With this study, it was possible to verify the deficiency about the evaluation of the efficiency of the solar forecasting methods studied here, as they are not able to quantify the system's precision and accuracy in absolute terms. It was also found that by adding AI, the efficiency analysis requires a deeper study. In bibliometrics, it was found that short-term solar forecasting is a very current topic, and that currently the reference countries in the study of this topic are the United States and China.*

Key words: *Short-term solar forecast; Photovoltaics; Intra-hour solar forecast.*