



## Grupo de Estudo de Planejamento de Sistemas Elétricos-GPL

### Redução de Incertezas Relacionadas ao Recurso Solar no Brasil Via Dispersão Geográfica

**ANDRE MOURA GOMES DA COSTA(1); WADAED UTURBEY(1); BRUNO MARCIANO LOPES(2);  
UFMG(1); Cemig D(2);**

#### RESUMO

Sistemas de geração solar fotovoltaica distantes geograficamente entre si tendem a apresentar perfis de geração distintos devido às suas diferenças quanto à disponibilidade e à variabilidade do recurso solar. Conseqüentemente, a dispersão geográfica é uma estratégia interessante para se reduzir (aproveitar) os efeitos negativos (positivos) das variabilidades do recurso. Variações de escalas de tempo mais longas estão relacionadas a incertezas na geração, e busca-se minimizá-las. Este trabalho utiliza análise de clusters para avaliar como a dispersão geográfica pode reduzir a variabilidade conjunta, considerando pares de localizações. Os resultados indicam que a expansão da geração FV no MS pode ser interessante.

#### PALAVRAS-CHAVE

Variabilidade do Recurso Solar, Análise de Clusters, Complementariedade Energética

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas de conversão de energia fotovoltaicos (FV) está em acelerado crescimento em todo o mundo. A potência instalada mundial, que era de 15 GWp em 2008, atingiu 100 GWp em 2012 e 400 GWp em 2017. Ainda, é previsto que esse valor possa ultrapassar 1,2 TWp, em 2022 (1).

No Brasil, a utilização de sistemas de geração distribuída fotovoltaica (GDFV) ganhou força a partir de 2014, impulsionada pela redução de custos de implantação e viabilizada pela Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL (2,3). No mesmo ano, foi realizado o primeiro leilão de energia elétrica envolvendo diretamente a modalidade solar, com lances exclusivos para esta modalidade de geração (ver Tabela 1). É interessante verificar que a distribuição espacial dos sistemas geradores é muito distinta para essas duas modalidades de geração e que para ambos os casos, não é muito bem distribuída ao longo do país (ver Figura 1, feita a partir de dados de (4)).

Tabela 1 – Resumo de Leilões de Energia Solar

Leilão	Data do Leilão	Início do Provimento	Preço Médio [R\$]	Preço Médio [US\$] <sup>1</sup>	Potência Contratada [MW]
08/2014	31/10/2014	01/10/2017	215,17	89,47	889,66
08/2015	28/08/2015	01/08/2017	301,79	84,88	833,80
09/2015	13/11/2015	01/11/2018	297,15	78,98	929,34
04/2017	18/12/2017	01/01/2021	145,71	44,22	574,00

<sup>1</sup>Considerando taxa de conversão à época de cada leilão

01/2018	04/04/2018	01/01/2022	118,07	35,38	806,64
---------	------------	------------	--------	-------	--------

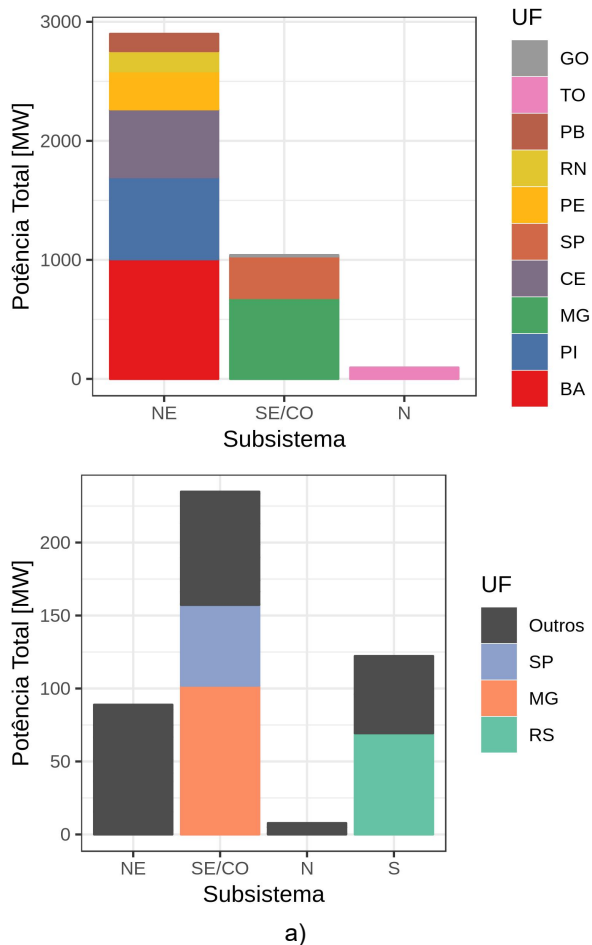


FIGURA 1 – (a) Distribuição dos ganhadores dos leilões de energia solar, entre estados e subsistemas da potência.

(b) Distribuição da potência instalada em GDFV, ao final de 2018, entre subsistemas e estados.

O desenvolvimento da tecnologia e a consequente redução de custos de geração apontam para a forte expansão desse tipo de sistema no Brasil (5). Considerando este crescimento, juntamente com as mudanças estruturais em curso no setor elétrico, o conhecimento sobre a dinâmica da disponibilidade energética parque fotovoltaico é importante para a definição de regras e regulações acertadas. Uma das características mais importantes, ao descrever comportamento da disponibilidade do recurso solar, é a sua variabilidade, que se dá devido a fatores previsíveis, relacionados à rotação e translação da terra, e por fatores estocásticos, como as condições atmosféricas e de nebulosidade do céu (6).

Uma maneira conhecida para se amenizar efeitos da variabilidade da disponibilidade do recurso solar, é a dispersão geográfica dos sistemas geradores. Esta estratégia se baseia no fato de que as condições climáticas e temporais em duas localidades tendem a se diferenciar mais quanto maior a distância entre elas. Assim, sistemas distantes tendem a apresentar menores ocorrências simultâneas de variações similares do nível de radiação disponível, fazendo com que um portfólio composto de geradores dispersos entre si apresente menores variabilidades e incertezas do que as apresentadas por um portfólio mais centralizado. Este efeito é válido para variabilidades de diferentes escalas de tempo, desde inferiores a minutos, até superiores a semanas (7). Em longas escalas de tempo, pode-se pressupor a existência de localidades cujas disponibilidades sejam complementares, reduzindo a variabilidade conjunta.

Variações de curtos intervalos de tempo, com escalas de até uma hora, causadas por passagens de nuvens menores, afetam a produção energética em uma escala mais local, e seus maiores impactos são relativos à qualidade de energia elétrica. Um destes efeitos é a flutuação de tensão em redes de distribuição de média e baixa tensão que tenham alta densidade de GDFV (8, 9). Variabilidades pertinentes a análises de maiores intervalos de tempo persistem em extensas áreas geográficas, da ordem de milhares de quilômetros quadrados

ou mais, como regiões ou países, por exemplo. Neste contexto, tem-se questões tais como de disponibilidade de energia. Em (10), é destacada a importância da consideração de variabilidades a longo prazo, interanuais, em análises de investimentos. Há, no entanto, ainda poucos estudos na literatura sobre a dinâmica de longo prazo do recurso solar em áreas de tamanho continentais, como é o caso do Brasil (11). Estudos que avaliam a variabilidade do recurso solar no país o fazem considerando apenas variações locais, como é o caso do Atlas Brasileiro de Energia Solar (12), ou são direcionados a fenômenos de curto prazo (13).

Este trabalho relata a investigação de possíveis estratégias para a redução das variabilidades e incertezas da geração solar no Brasil, em resolução mensal, por meio da dispersão geográfica de sistemas geradores. Portanto, trata-se de um suporte ao planejamento energético e a definições de políticas relacionadas, visando a redução dos custos da geração de energia elétrica e da operação eletroenergética. Para tal avaliação, foram utilizadas técnicas de estatística multivariada, especialmente a análise de cluster, já utilizada para estudos similares, em escalas menores (6). A metodologia proposta, neste trabalho, é original ao utilizar, em avaliação de pares, um índice com resultados mais práticos do que o da correlação, além da apresentação de métodos visuais que permitem um melhor entendimento dos dados obtidos.

## 2.0 - METODOLOGIA

### 2.1 Dados utilizados

Este trabalho utiliza dados provenientes do projeto POWER (*Prediction Of Worldwide Energy Resources*; em tradução livre para o português: *Predição Mundial de Fontes de Energia*) do Centro de Pesquisas Langley (LaRC) da agência espacial americana, NASA, financiado pelo *NASA Earth Science/Applied Science Program*. Este projeto disponibiliza, gratuitamente, em sua página da *web*, dados climáticos relacionados a várias tecnologias de geração de energia renovável, tais como velocidade de vento a diferentes alturas, temperatura e precipitação, provenientes de processamento de imagens de satélite. Dentre estas grandezas, são disponibilizados dados diários de irradiação, obtidos como modelo SRB v3.0 do projeto GEWEX, para o período de julho de 1983 até dezembro de 2007. A partir desta data são disponibilizados dados obtidos com versões diversas de outro modelo, FLASHFlux. Optou-se por utilizar, neste trabalho, apenas dados provenientes do modelo SRB v3.0, por este conter a mais longa série derivada de um só modelo e evitar inconsistências e vieses que poderiam surgir na análise com dados de modelos distintos. Em (14), podem ser encontradas informações sobre as modelagens utilizadas no projeto POWER, junto às suas validações.

Os bancos de dados de irradiação global horizontal são disponíveis em uma base de resolução diária para uma grade com dimensões de 1° por 1°, cobrindo o território nacional. Cada elemento com dimensões de 1° de longitude por 1° de latitude, ou *pixel*, contém séries de dados médios ao longo da área que representa. Para cada *pixel* no Brasil foi obtida a respectiva série histórica de irradiação global no plano horizontal diária. Para isso, foi desenvolvido pelos autores, um script em R (15) que acessa e extrai dados do sistema POWER, por meio de sua Interface de Programação de Aplicativos. Devido a inconsistências verificadas em dados relativos aos anos de 1983 a 1987, estes foram descartados. Assim, são utilizados dados do período entre 1988 e 2007 (ver Figura 2).

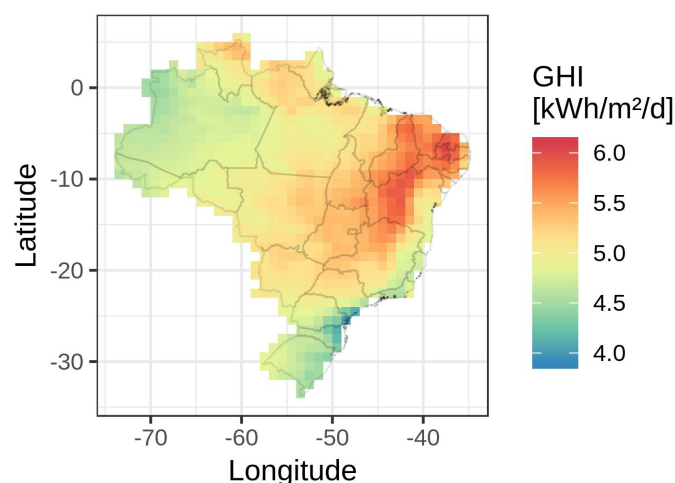


FIGURA 2 – Irradiação Global Horizontal média verificada nos dados para o período analisado.

Uma vez que o objeto do estudo é a variabilidade mensal, os dados diários foram integralizados mês a mês, para cada *pixel*. Visando remover efeitos relacionados a escalas de tempo mais lentas, que poderiam, por exemplo, afetar as correlações entre dois pontos, é utilizado um filtro de médias móveis com janela de 12 meses. Assim, as variabilidades interanuais são amenizadas.

Para compreender o comportamento variável do recurso solar, é importante considerar que há um comportamento sazonal, que se repete ao longo dos anos, e analisá-lo separadamente dos desvios deste padrão, relacionados às incertezas. Então, é proposto, que essas componentes sejam tratadas separadamente. Assim, para cada pixel analisado, são obtidas séries sazonais, cujos valores mensais são as médias de longo prazo da irradiação no respectivo mês, e séries de resíduo mensal, ou seja: os desvios em relação às médias de cada mês. A remoção dos efeitos sazonais e de fenômenos lentos se dá por meio de decomposição de séries temporais. É interessante observar que a utilização do índice de claridade e suas variações, como é feito em alguns estudos, especialmente relativos a escalas menores (7,16) elimina alguns efeitos sazonais, mas não lida com fenômenos climáticos recorrentes. O uso destes índices também não é o mais apropriado para estudos continentais uma vez que um mesmo valor (do índice) pode representar radiações muito diferentes em localidades distintas, deixando menos direta a interpretação dos resultados.

## 2.2 Análise

Este trabalho tem foco na análise na série de resíduo mensal, relacionada a incertezas intra-aneais da geração solar. Análises de outros aspectos, tais como a sazonalidade e variações a mais longo prazo, podem ser verificadas em (17). Para a avaliação, é proposta a utilização de técnicas de análise de cluster, de maneira similar ao que é feito em (6). Com isso, busca-se encontrar diversas áreas em uma região, que apresentem padrões consistentes entre si da disponibilidade do recurso solar. Assim, não é necessária a avaliação do comportamento de cada pixel, mas apenas de pontos mais representativos dos dados. Adotou-se a técnica k-medoides, implementada pelo algoritmo PAM (18), disponível no R no pacote Cluster. Esta técnica é similar à k-médias, comumente utilizada em contextos similares, tais como a compreensão da dinâmica do recurso solar na península Ibérica (6) e a definição de microclimas solares coerentes para melhorar o planejamento e operação de sistemas elétricos na Califórnia (16). O k-medoides se difere do k-medias pois, ao invés de se representar os grupos pelas médias de suas variáveis, a representação se dá pelos seus medoides, que são os elementos mais representativos de cada grupo. O número de partições é definido de forma simples e com sentido mais claro do que em (6, 16), os quais utilizam combinações de índices de validação interna e o chamado “método do cotovelo” (17). Foram definidas partições que garantissem que até um dado valor de variância seja explicada pela análise de clusters. No caso, foi definido, arbitrariamente, um valor de 75%, pois este valor possibilita a compreensão geral do comportamento na área analisada, e incrementos significariam grandes aumentos no número de partições.

Uma vez obtidos os grupos e seus *pixels* representativos (medoides), é proposto a realização de avaliações da forma em que pares de localizações se comportam entre si, visando identificar, por exemplo, pares de regiões que apresentam complementariedade em relação à disponibilidade do recurso solar. Para tal avaliação, o coeficiente mais comumente utilizado é o de correlação de Pearson, que quantifica se desvios de duas variáveis tendem a ocorrer ao mesmo tempo ou não e para sentidos iguais ou distintos. Entretanto, este índice pode falhar em expressar resultados mais práticos, como tamanho dos desvios e o comportamento agregado de um portfólio de geradores.

Para se obter resultados mais visuais e de maior uso prático, é proposto um novo índice, o OPCV (*Optmal Pairwise Coefficient of Variation* ou, Coeficiente de Variação Ótimo do Par), que busca avaliar pares e suas variabilidades de maneira similar a análises de portfólios. Este índice se baseia no coeficiente de variação (CV), que é definido como a razão entre o desvio padrão e a média. Deve-se ter em mente que, neste contexto, divide-se o desvio padrão da série de resíduos, que representa a variabilidade aleatória, pela média de longo prazo de irradiação. O OPCV visa quantificar o menor CV possível para um portfólio composto por geradores solares em dois locais distintos, considerando a proporção ideal de instalação em cada localidade (como, por exemplo, de 40% em uma delas e 60% na outra). Assim, cada par também apresenta um valor de GHI médio para essa proporção do OPCV. As proporções ótimas são identificadas, por meio da função *optim()* disponível no R.

É desejável que, para um dado portfólio, este coeficiente seja o menor possível, de modo que haja menor variação aleatória do conjunto. Pares com alta complementariedade e baixos CVs tendem a apresentar os menores valores de OPCV, enquanto pares com séries similares e altos CVs, os mais elevados. Em relação ao coeficiente de correlação, este índice valoriza locais que já apresentam baixas variabilidades, enquanto penaliza pares com alta complementariedade, mas que apresentam altas variabilidades mesmo quando associados. Deve-se também observar que o OPCV é adimensional, e pode ser usado na comparação de outras fontes de energia e investigar complementariedades entre elas (se utilizadas, por exemplo, séries de potencial de geração de duas fontes).

Neste trabalho, propõe-se que seja feita, também, uma análise complementar à baseada em partições. Para isso, gera-se mapas mostrando as estatísticas de todos os pares em relação a pontos de interesse. Isso permite uma melhor visão espacial do comportamento de pares de localidades. Ademais, um programa para esta visualização, em que o usuário pode selecionar os pontos de interesse por meio de uma interface amigável está em desenvolvimento. A Figura 3 resume a metodologia utilizada. Todo o processo é realizado por meio de algoritmos desenvolvidos no programa R (15).

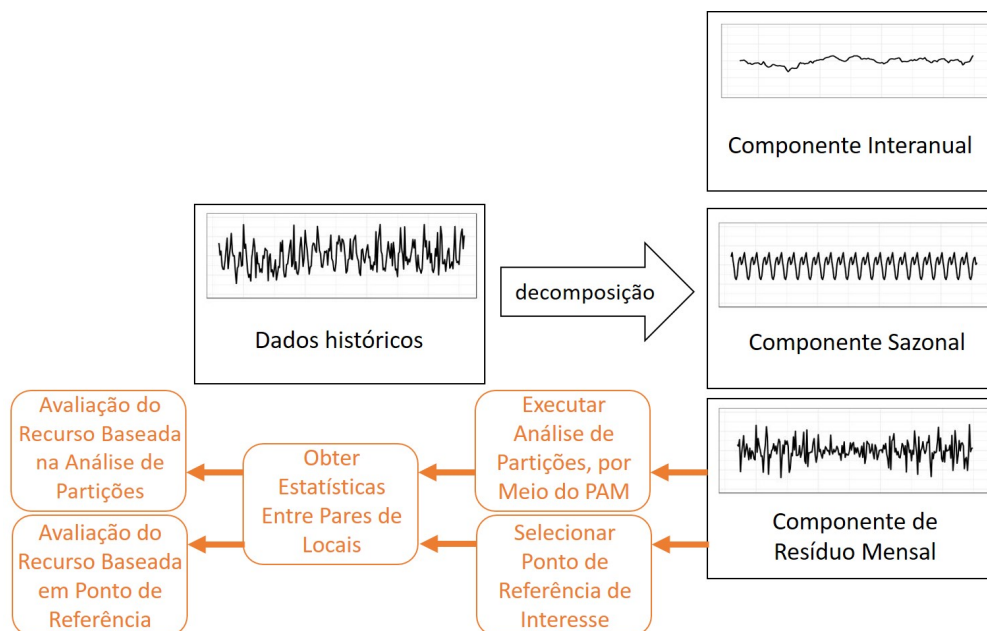


FIGURA 3 – Esquemático Simplificado da Metodologia Utilizada

### 3.0 - RESULTADOS

O algoritmo da análise de clusters, PAM, foi executado considerando como entrada as séries de resíduo mensal de cada *pixel*. O número de partições mínimo para se obter uma porcentagem de variância explicada superior a 75% foi de 39. As partições obtidas e seus respectivos medoides podem ser vistos na Figura 4a. Cada medoide foi rotulado com um número, definidos em uma ordem crescente, de norte a sul e de oeste a leste. O CV para cada *pixel* analisado é apresentado na figura 4b.

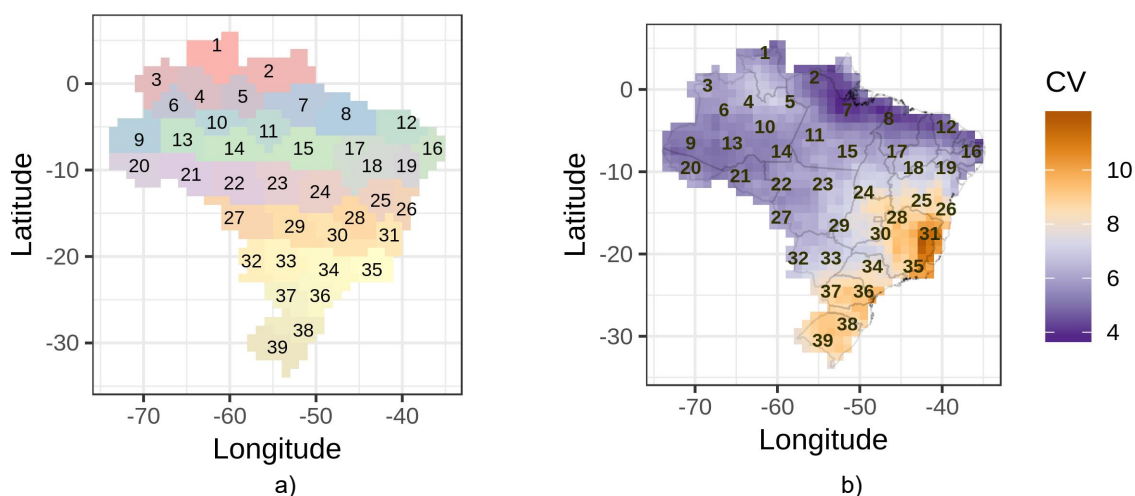


FIGURA 4 – (a) Partições obtidas e seus medoides rotulados com o número referente à sua partição. (b) Coeficiente de variação do resíduo mensal para a área nacional.

A Figura 5a mostra os mapas de calor dos coeficientes de correlação. A interpretação dessa figura é que pares de medoides (e regiões) com valores mais negativos de correlação (isto é, mais verdes) têm alta complementariedade entre as duas localidades. Pode-se observar, por exemplo, correlações mais negativas entre a região mais ao sul (medoides 38 e 39) com a região do norte de Minas Gerais e Goiás (medoides de 29 a 31), pares demarcados com retângulo azul. Outra maneira interessante para se interpretar este mapa de calor é avaliando linhas (ou colunas) referentes a regiões de interesse. Na figura, foram ressaltadas, com retângulos pretos, as linhas relativas à região Nordeste (medoides 12, 16-19, 25-26), dado que possui elevados índices de radiação e, conseqüentemente, um grande potencial para o uso da energia solar. É verificável que correlações baixas, ou negativas, em relação a tal região ocorrem, principalmente, no noroeste do país (medoides 1, 3-6), na região próxima ao Mato Grosso do Sul (medoides 32,33) e nas localidades mais ao sul (medoides 36-39).

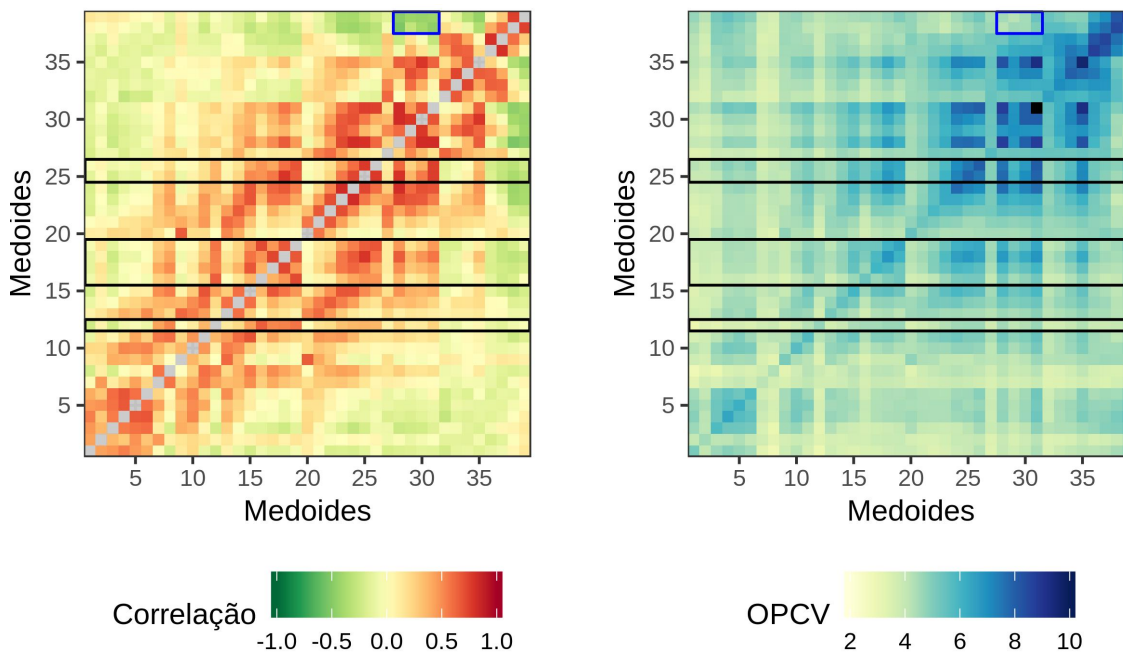


FIGURA 5 – (a) Mapa de calor das correlações.  
(b) Mapa de calor dos OPCV.

A Figura 5.b apresenta os mapas de calor do OPCV. Buscando-se pares de localidade com baixos valores de OPCV, identifica-se que certos medoides (como 2, 7 e 8) apresentam baixo OPCV quando assimilados com todos os outros medoides. De fato, estes são medoides que já apresentam baixo CV (ver figura 4b). Por outro lado, é interessante observar que os pares com correlações mais negativas não apresentaram os mais baixos OPCV (retângulo azul). Ainda, analisando linhas relativas a medoides no Nordeste (12; 16-19; 25-26), semelhanças são verificadas em relação ao mapa de calor das correlações. Locais com correlações baixas e negativas (noroeste do país, MS e região Sul) tenderam a apresentar menores coeficientes de variação ótimos. De fato, era de se esperar que a complementariedade resultasse em variações globais menores. Ainda, deve-se atentar ao fato de que a correlação não é o único fator que influencia o OPCV, que também é impactado pelos valores de variabilidade nos locais do par.

Para melhor visualizar a dinâmica deste índice, é feito um gráfico da irradiação global horizontal (GHI) média da combinação ótima de cada par versus o respectivo OPCV (ver Figura 6). Regiões de maior interesse, com alto potencial solar e baixa variabilidade são ressaltadas no gráfico. Pontos nessas regiões são rotulados com os números dos elementos que compõem seus pares, e tem suas cores relativas aos subsistemas destes. Assim, é possível observar que pares relativos aos subsistemas NE-NE, NE-N, e NE-SE/CO são mais destacados. É importante ressaltar que Roraima foi considerado pertencente ao subsistema Norte, levando em conta a previsão de conexão, e que o medoide 1, de maior destaque deste subsistema, se encontra neste estado. O outro medoide de grande destaque foi o 2, no norte do Pará. Em relação ao subsistema SE/CO, é verificável um destaque de elementos próximos ao nordeste (28, 30, 31), com alta disponibilidade do recurso solar, e de elementos mais ao sudoeste, próximos ao Mato Grosso do Sul (27, 29, 32, 33, 34), que apresentam baixos OPCV quando associados ao Nordeste.



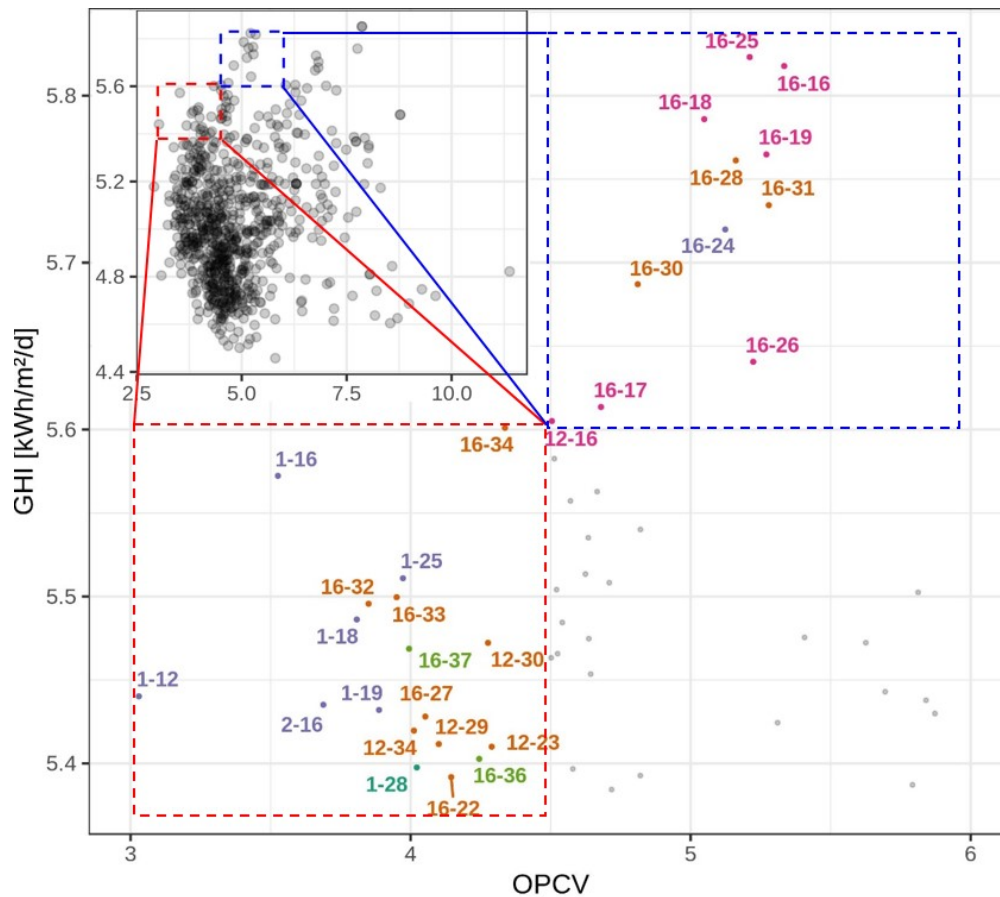


FIGURA 6 – Irradiação global horizontal versus o OPCV de pares de medoides. Rubricas mostram os medoides dos pares, que podem ser identificados na Figura 4.

Cores são relativas aos subsistemas:

N-SE/CO=Azul Esverdeado; N-NE=Lilás; NE-NE=Rosa; NE-S=Verde; NE-SE/CO=Laranja.

Um aspecto interessante do OPCV é que o índice permite, ao se realizar avaliação de pares, analisar o compromisso entre o potencial de geração e a variabilidade de portfólios. Por exemplo, comparando-se os pares 16-25 e 1-16, pode-se observar uma redução de 4% da GHI (de 5,82 kWh/m<sup>2</sup>/dia para 5,57 kWh/m<sup>2</sup>/dia) associada a uma redução de 33% do OPCV (de 5,2 para 3,5). Este caso exemplifica que a distribuição espacial i bem planejada de sistemas geradores pode reduzir significativamente as incertezas da geração solar, com leves diminuições do potencial de geração do portfólio. Uma política de leilões que não considera estas questões pode desperdiçar esta capacidade. É interessante ressaltar que o uso de coeficiente de correlação não permite a obtenção deste tipo de informação, dado que é muito difícil traduzir as diferenças nas correlações (0,5 e -0,2) em resultados práticos diretamente.

### 3.1 Resultados Baseados em Pontos de Referência

Para complementar o estudo, foram realizadas análises baseadas em pontos de referência. Aqui são apresentadas as correlações e OPCV para o país considerando quatro locais de interesse e bem distribuídos pelo país: o primeiro, em Patos, PB, área do *pixel* com o maior nível de radiação média do banco de dados (6,00 kWh/m<sup>2</sup>/dia); O segundo, a em Belo Horizonte, capital do estado com maior utilização de GDFV à época de elaboração deste artigo; O terceiro, relativo ao medoide 1, em Roraima, devido ao seus resultados na análise anterior; E o quarto, relativo ao medoide 32, no Mato Grosso do Sul, pela mesma razão.

Os mapas obtidos (ver Figura 7) mostram a gradativa diminuição da correlação com o aumento da distância, para cada localidade e para os diferentes sentidos. Pode-se notar que, para Patos e Belo Horizonte, correlações positivas podem ser observadas a distâncias muito maiores dentro do território nacional do que para os medoides 1 e 32. Também, há consideráveis semelhanças das áreas com correlações positivas quando comparadas estas localidades, apesar dos centros de mais alta correlação serem distantes. É interessante perceber na análise centrada em Belo Horizonte, a diminuição mais rápida das correlações indo no sentido sudoeste (analogamente, partindo do Medoide 32, pode-se observar esta rápida diminuição no sentido nordeste).

Em relação aos OPCV, verifica-se, novamente, os bons potenciais dos estados de MS e RR quando associados ao Nordeste. Ademais, o uso desta abordagem permite uma exploração melhor de certas áreas, mais distantes dos medoides, que não são muito bem representadas na análise de clusters. Uma área a ser destacada é a do nordeste do Pará, que possui níveis de radiação superiores aos verificados no medoide 7, de seu cluster, e apresenta baixos OPCV quando associada às quatro localizações de referência analisadas.

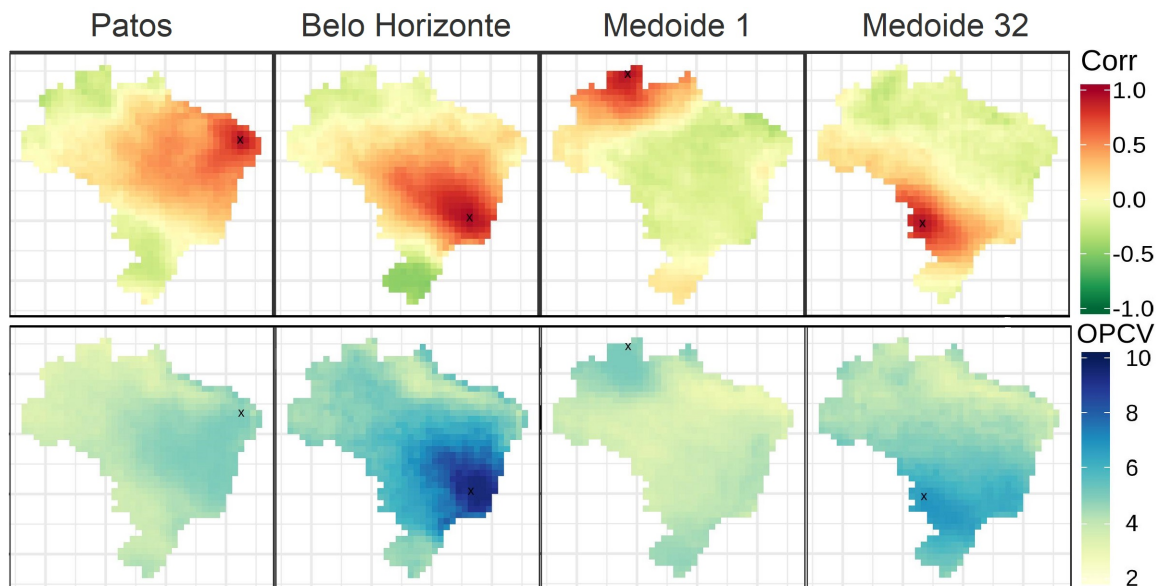


FIGURA 7 – Estatísticas de pares (correlação e OPCV) em relação a pontos de interesse. Da esquerda para a direita: Patos, PB; Belo Horizonte, MG; Medoide 1, RR; Medoide 32, MS

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma avaliação da variabilidade do recurso solar em escala mensal e o uso da dispersão geográfica para lidar com este efeito. Para a análise, utilizou-se técnicas de decomposição de séries temporais e de análise de clusters. Neste trabalho, foram dadas contribuições à literatura internacional: proposta de utilização do método k-medoides; apresentação do OPCV; e a utilização de novas formas de se visualizar dados sobre o comportamento espaço-temporal do recurso solar. Os resultados obtidos são úteis no entendimento da dinâmica solar no território brasileiro e auxiliar no planejamento da expansão da matriz de geração elétrica.

Dentre os resultados, destacam-se as vantagens de se expandir a geração FV em regiões do MS e do nordeste do PA, sob o ponto de vista da redução da variabilidade e da incerteza de geração. Vale observar que estas não são áreas que apresentam tendências de grande crescimento do uso de energia solar. Estas regiões apresentam bons OPCV quando associadas ao Nordeste do Brasil e ao norte de Minas. A região do Roraima também apresentou bons resultados. Entretanto, ainda não está conectada ao SIN e quando estiver, ainda podem existir questões relacionadas à limitação da capacidade de escoamento de energia. Verificou-se que a alocação dispersa de geradores de forma bem planejada pode diminuir efeitos da variabilidade do recurso solar, sem, no entanto, causar muito impacto na capacidade de produção de energia e em custos relacionados. Entretanto, deve-se ressaltar que, para que essa distribuição seja feita, é preciso criar mecanismos apropriados, tais como leilões locais ou que incentivem monetariamente estes benefícios, ou políticas de incentivo para a geração distribuída nestes locais.

Considerando a dinâmica da variabilidade do recurso solar ao longo do país, foi mostrado que diferentes locais possuem características distintas e diferentes potenciais para minimizar variabilidades. A análise foi feita considerando uma resolução temporal mensal, mas efeitos similares podem ser investigados em outras escalas, mais longas ou mais curtas. A dispersão geográfica pode ser útil para lidar, ao mesmo tempo, com diversos efeitos da variabilidade energia solar: reduzindo incertezas de geração e melhorando o funcionamento dos sistemas, ao amenizar flutuações de tensão e efeitos da chamada “curva do pato”. É de grande importância o entendimento destas dinâmicas e de como elas afetam a expansão e a operação do sistema eletroenergético nacional, e os custos associados.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- (1) SOLAR POWER EUROPE. Global market outlook for solar power 2015–2019.
- (2) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Número 482/2012. Brasil.
- (3) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Micro e Minigeração Distribuída: Outorgas e Registros de Geração. Disponível em: <<https://bit.ly/29qs6Cy>>. Brasil. Acesso em 15 abr. 2019
- (4) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Editais de Geração: Leilões de Geração. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao4>>. Brasil. Acesso em 15 abr. 2019.
- (5) EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. Brasil. 2018.
- (6) GUTIÉRREZ, C. et al. A multi-step scheme for spatial analysis of solar and photovoltaic production variability and complementarity. *Solar Energy*, v. 158, p. 100–116, dez.2017. ISSN 0038092X.
- (7) PEREZ, M. J.; FTHENAKIS, V. M. On the spatial decorrelation of stochastic solar resource variability at long timescales. *Solar Energy*, v. 117, p. 46–58, jul. 2015. ISSN 0038092X.
- (8) MILLS, A; WISER, R. Implications of wide-area geographic diversity for short-term variability of solar power. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Estados Unidos. 2010.
- (9) LAVE, M.; RENO, M. J.; BRODERICK, R. J. Characterizing local high-frequency solar variability and its impact to distribution studies. *Solar Energy*, v. 118, p. 327–337, ago.2015. ISSN 0038092X.
- (10) BRYCE, R. et al. Consequences of neglecting the interannual variability of the solar resource: A case study of photovoltaic power among the Hawaiian Islands. *Solar Energy*, v. 167, p. 61–75, jun. 2018. ISSN 0038092X.
- (11) ENGELAND, K. et al. Space-time variability of climate variables and intermittent renewable electricity production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 600–617, nov. 2017. ISSN 13640321.
- (12) INSTITUTO NACIONAL DE PESTQUISAS ESPACIAIS. Atlas brasileiro de energia solar. Segunda edição. 2017. Brasil. ISBN 978-85-17-00089-8.
- (13) LUIZ, E. W. et al. Analysis of intra-day solar irradiance variability in different Brazilian climate zones. *Solar Energy*, v. 167, p. 210–219, jun. 2018. ISSN 0038092X,
- (14) STACKHOUSE, P. W. et al. POWER Release 8 (with GIS Applications) Methodology (Data Parameters, Sources, & Validation) Documentation. Estados Unidos. 2018.
- (15) R Core Team.R: A Language and Environment for Statistical Computing. Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em 15 abr. 2019.
- (16) ZAGOURAS, A.; INMAN, R. H.; COIMBRA, C. F. On the determination of coherent solar microclimates for utility planning and operations. *Solar Energy*, v. 102, p. 173–188, abr. 2014. ISSN 0038092X.
- (17) COSTA, A.M.G. Análise da Dinâmica de Longo Prazo do Recurso Solar no Território Brasileiro Utilizando Decomposição de Séries Temporais e Técnicas de Estatística Multivariada. UFMG. Dissertação de mestrado. 2019. Brasil
- (18) KAUFMAN, L.; ROUSEEUW, P. J. Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis. First edition. Hoboken, New Jersey: *John Wiley and Sons, Inc*, 1990. ISBN 0-471-73578-

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



André Moura Gomes da Costa possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2017), e mestrado em Engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2019). Já participou de projetos de pesquisa relacionados a despacho de geração; modelagem de fluxo de carga; avaliação de impactos da geração fotovoltaica em redes de distribuição; modelagem da geração fotovoltaica. Atualmente tem interesse no uso de ciência de dados no contexto da energia solar.



Bruno Marciano Lopes possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2003) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2006). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: afundamento de tensão, qualidade da energia, restaurador dinâmico de tensão, cálculo de perdas e projeto de conversores. Trabalha desde 2006 na Superintendência de Tecnologia, Inovação e Eficiência Energética da CEMIG, onde atuou ou atua na supervisão técnica do Balanço Energético de Minas Gerais, estudos prospectivos sobre energia, análise de fontes e tecnologias alternativas de energia e geração distribuída e gerencia projetos de P&D relacionados a alternativas energéticas. É doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, na área de planejamento energético, sob orientação da Professora Wadaed Uturbey.



Wadaed Uturbey possui graduação em Ingeniería Eléctrica - Universidad de La República (1991), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1995) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2002). Atualmente é professor associado da Universidade Federal de Minas Gerais. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: planejamento da operação, mercados de energia elétrica, gerenciamento pelo lado da demanda, fluxo de potência ótimo.