



Evento: XXVI Jornada de Pesquisa

MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO ENERGIA FOTOVOLTAICA NAS QUATRO ESTAÇÕES DO ANO NA REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL¹

MATHEMATICAL MODELING OF THE BEHAVIOR OF PHOTOVOLTAIC ENERGY GENERATION CAPACITY IN THE FOUR SEASONS OF THE YEAR IN THE NORTHWEST REGION OF RIO GRANDE DO SUL

Mônica Nejar de Almeida², Cristina Schoefer Dessbesell³, Moises Machado dos Santos⁴, Paulo Sérgio Sausen⁵, Airam Teresa Z, R. Sausen⁶, Mauricio de Campos⁷

¹ Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí, no programa de pós graduação em Modelagem Matemática e Computacional e no GAIC - Grupo de Automação Industrial e Controle.

² Estudante na UNIJUI do curso de pós graduação em Modelagem Matemática e Computacional - Nível mestrado.

³ Estudante na UNIJUI do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica - Bolsista PROBIC/FAPERGS.

⁴ Professor Doutor do Curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI.

⁵ Professor Doutor do Curso de pós graduação em Modelagem Matemática e Computacional e Professor do curso de Ciência da computação da UNIJUI. Bolsista Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico do CNPq - Nível 2.

⁶ Professora Doutora do Curso de pós graduação em Modelagem Matemática e Computacional e Professor do curso de Matemática da UNIJUI.

⁷ Professor Doutor do Curso de pós graduação em Modelagem Matemática e Computacional e Professor do curso de Engenharia Elétrica da UNIJUI. Bolsista Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico do CNPq - Nível 2.

RESUMO

A crescente demanda de energia, aliada à preocupação com o meio ambiente e a preferência por fontes de energias renováveis, faz com que a substituição parcial das atuais matrizes energéticas seja apenas uma questão de tempo. A geração distribuída, com foco na energia proveniente de placas fotovoltaicas, é um grande exemplo desse cenário, e levando em consideração que atualmente a utilização dos mesmos em cenários rurais é significativamente menor que no urbano, estudos de gerenciamento de demanda e otimização, para esse tipo de aplicação precisam ser potencializados. Destaca-se que o baixo uso da energia solar no meio rural se dá por fatores econômicos, e ainda, devido a dificuldade de realizar a conexão da geração de energia na rede elétrica, decorrente da localização geográfica entre as instalações. Este artigo faz uma análise da capacidade de geração fotovoltaica na região noroeste do Rio Grande do Sul nas quatro estações do ano. São apresentados modelos que atendem com boa acurácia essa modelagem e permitem análises e estudos futuros nesses cenários.

Palavras-chave: energia solar, estações do ano, modelagem matemática, geração distribuída.

ABSTRACT

The growing demand for energy, combined with concern for the environment and the preference for renewable energy sources, means that the partial replacement of current energy matrices is just a matter of time. Distributed generation, focusing on energy from photovoltaic plates, is a great example of this scenario, and considering that currently their use in rural



scenarios is significantly lower than in urban, demand management and optimization studies, for this type of application need to be enhanced. It is noteworthy that the low use of solar energy in rural areas is due to economic factors, and also due to the difficulty of connecting power generation to the electricity grid, due to the geographic location between the facilities. This article analyzes the photovoltaic generation capacity in the northwest region of Rio Grande do Sul in the four seasons of the year. Models that meet this modeling with good accuracy and allow for future analysis and studies in these scenarios are presented.

Keywords: solar energy, seasons of the year, mathematical modelling, distributed generation.

INTRODUÇÃO

A questão energética tem se destacado nas discussões sobre a preservação do meio ambiente. Nesse sentido, há uma forte tendência na ampliação do uso de fontes renováveis de energia para a geração de eletricidade. Tal fato origina-se em função da identificação de vários desequilíbrios geofísicos, ocasionados por usos demasiados de recursos naturais, fazendo com que os riscos e os efeitos da degradação ambiental ficassem mais evidentes nas últimas décadas. Desta forma, observa-se uma orientação do cenário energético para a sustentabilidade, afinal o aumento de problemas ambientais decorre também do aumento do consumo de energia (MILLIGAN, 2009).

Com o aumento do consumo de energia no mundo é necessário encontrar novos recursos para poder atender essa expansão e manter a preocupação com a emissão de dióxido de carbono (CO₂), responsável por cerca de 60% do efeito-estufa, decorrente do uso de combustíveis fósseis, desflorestação e alteração do uso do solo (IPCC,1995).

Nesse cenário, a utilização da Geração Distribuída (GD) vem crescendo exponencialmente. A GD é um sistema de geração de energia elétrica, normalmente, conectada à rede elétrica de distribuição e próxima, ou no próprio local de consumo (INEE). Esse sistema difere do atual sistema que utiliza majoritariamente a Geração Concentrada (GC), o qual realiza a geração energia elétrica longe dos consumidores. Assim, é necessário transportar essa energia até os centros consumidores através do chamado Sistema Elétrico de Potência (SEP). É importante ressaltar ainda, que na etapa de transmissão de energia ocorrem diversas perdas.

O exemplo mais famoso de GD é a energia solar fotovoltaica, a qual pode ser usada na rede elétrica, on-grid, ou fora dela, off-grid, a utilização de placas fotovoltaicas vem se popularizando nos últimos anos e a tendência é que o seu uso cresça de maneira exponencial. A utilização de energia solar começou em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel que



descobriu o efeito fotovoltaico enquanto realizava experiências electroquímicas na garagem de seu pai. Em 1877 William Adams e Richard Day criaram o primeiro dispositivo de produção de eletricidade, com eficiência de 0,55%. Mas foi só em 1941 que Russel Ohl desenvolveu a primeira célula fotovoltaica de silício, material utilizado até hoje (ZILLES, 2012).

É importante salientar que, uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, elas geram eletricidade a partir do efeito fotovoltaico, que ocorre quando uma junção “P-N”, que é uma ligação de dois tipos de semicondutores, um do tipo P e outro do tipo N. Essa junção é exposta a fótons, gerando pares elétron-lacuna e um deslocamento de cargas, o que dá origem a uma diferença de potencial.

Entre suas limitações, os sistemas fotovoltaicos ainda possuem um baixo rendimento e alto custo. No entanto, como vantagens destaca-se que a energia solar é sustentável possuindo um baixo impacto ambiental e é normalmente viável se analisado seu *payback* a médio prazo.

Como já afirmado, a utilização das placas fotovoltaicas pode ser em sistemas off-grid ou on-grid. O sistema off-grid utiliza normalmente alguma forma de armazenamento de energia, geralmente baterias. Já o sistema on-grid, geralmente conta com números significativos de painéis fotovoltaicos, com a geração em grande parte sendo entregue à rede. Este sistema, necessita de um inversor conectado a um medidor de energia bidirecional (ZILLES, 2012). Se for produzida mais energia do que consumida, segundo a RN 687/2015 da Aneel e o módulo 3 do PRODIST, são gerados créditos, e atualmente, existe um período de 60 meses de validade desses créditos.

A energia solar possui um grande uso nas zonas urbanas e já começa a despontar nas áreas rurais, segundo os dados de 2020 da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), o setor rural corresponde 13,2% da potência instalada no Brasil e os investimentos nas propriedades ultrapassam R\$ 1,7 bilhão. Porém, devido às localizações geográficas das instalações, o uso da energia solar no meio rural acaba desqualificando os sistemas on-grid por exemplo. Para tal uso, é essencial que exista algum tipo de gerenciamento de demanda, ou seja, um equilíbrio entre a geração e o uso. Para permitir estudos dessa natureza, ou seja, para que estudos de otimização do gerenciamento de demanda de geração de energia fotovoltaica ocorram, é fundamental o conhecimento do potencial de geração fotovoltaica, na região de interesse e também, ao longo de todo o ano. Este trabalho portanto tem como objetivo



modelar matematicamente o comportamento da geração de energia fotovoltaica na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul nas quatro estações do ano, com vistas a estimar o máximo aproveitamento que pode ocorrer em cada uma delas.

MATERIAIS E MÉTODOS

A partir do monitoramento da geração de energia elétrica por placas fotovoltaicas é possível avaliar o comportamento da incidência solar ao longo do ano, na região noroeste do Rio Grande do Sul. Nesse sentido é importante detectar no banco de dados quatro dias, sendo um dia em cada estação do ano, onde a geração chegou ao seu ponto máximo e não houveram eventos de sombreamento. A partir desses dados, é realizada a normalização das curvas, tendo como referência sempre a curva de maior geração. A partir disso é utilizada técnicas de regressão a partir do MATLAB, onde são geradas funções que escrevam esse comportamento, para estudos e análises futuras.

A instalação escolhida para coleta dos dados, é uma das maiores unidades geradoras do município de Ijuí, em uma instalação recente. Isso define duas vantagens diretas, a primeira diz respeito a qualidade das placas, haja vista que uma instalação mais nova tem normalmente tecnologias mais avançadas e conseqüentemente melhores rendimentos nos sistemas de conversão. Mas o mais importante é que em uma instalação nova, as placas ainda não sofreram o desgaste do tempo e estão limpas, impedindo que fatores como depósito de poeira/sujeira nas placas prejudiquem seu desempenho.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

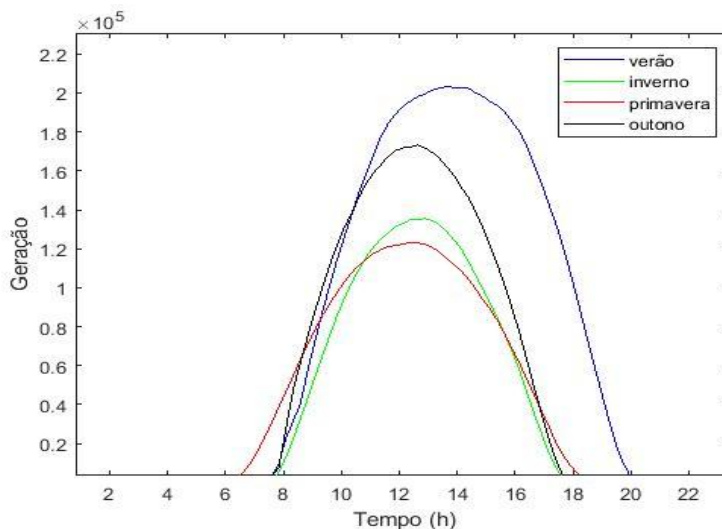
Para a estação do verão, é analisada a geração solar do dia 17 de Fevereiro de 2021, para o outono, dia 12 de Maio de 2021, para o inverno, dia 08 de Julho de 2021 e para a primavera, dia 06 de Outubro de 2020. Estas datas atenderam os requisitos acima mencionados.

A partir da Figura 01, observa-se a composição destes quatro dias, o que permite tecer algumas considerações. Pode-se perceber, naturalmente, que a maior geração de energia solar acontece no verão. Nesse sentido, dentro do período analisado, no dia 17 de Fevereiro de 2021, tem-se um pico de geração mais significativo. Além disso, em função de possuir dias mais longos, o período de geração nesse dia é superior aos demais. A partir dessa curva é,



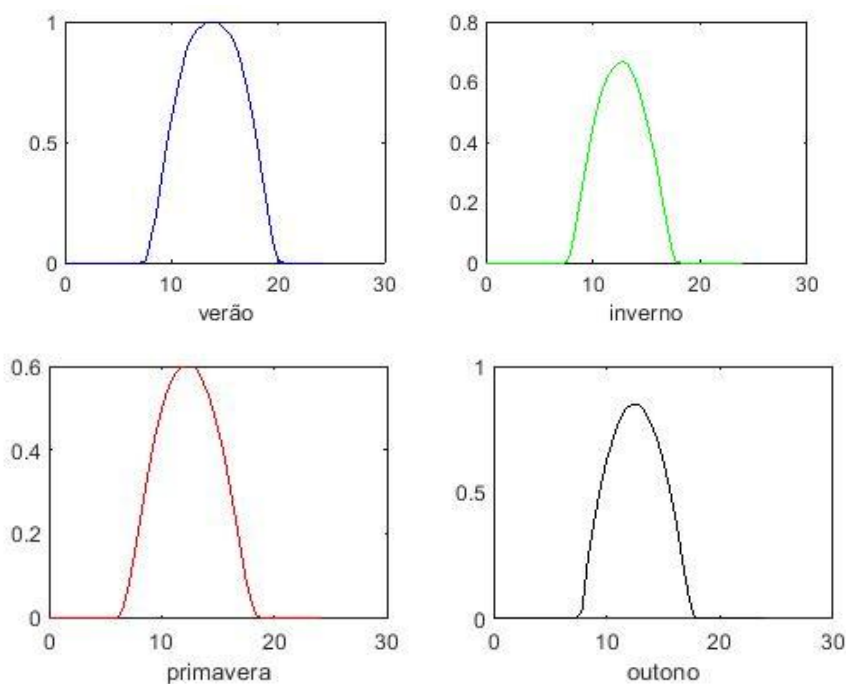
portanto, realizada a normalização dos gráficos, levando como referência sempre a geração que ocorre no verão, sendo o seu valor máximo considerado “1” para fins de análise.

Figura 01 - Geração de energia solar Máximo em cada estação do ano.



Na figura 02 observa-se separadamente os resultados da normalização de cada um dos dados do verão (a), inverno (b), primavera (c) e outono (d).

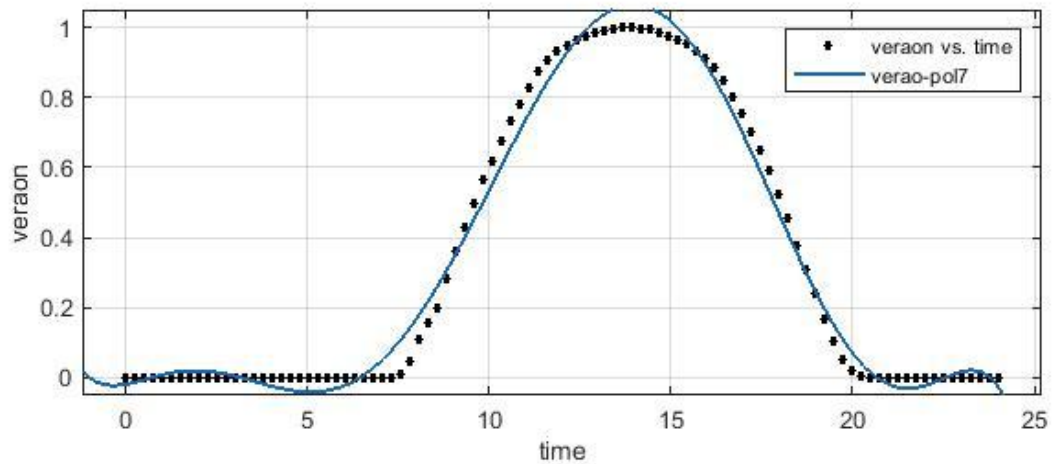
Figura 02 - Dados do (a) verão, (b)inverno, (c) primavera e (d)outono normalizados.





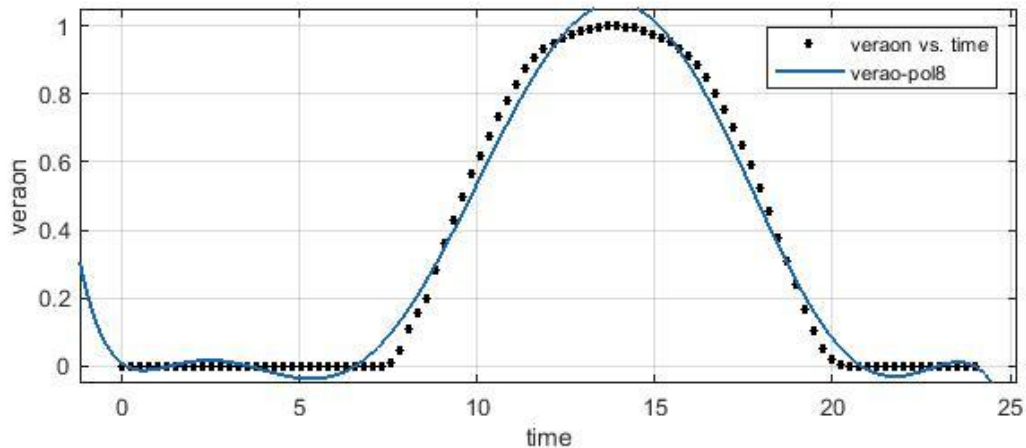
Utilizando a ferramenta “*cftool*” do MATLAB, é possível encontrar funções matemáticas a partir dos gráficos de geração de energia elétrica, isso é realizado para todas as estações do ano. Com essa ferramenta é escolhido gerar funções polinomiais de grau 7 e 8. Assim, na figura 03 é apresentado o resultado gráfico da regressão dos dados do verão a partir de um polinômio de grau 7.

Figura 03 - Representação da curva de verão por regressão polinomial grau 7.



Da mesma forma, na figura 04, é possível observar o gráfico apresentado os resultados para um polinômio de grau 8.

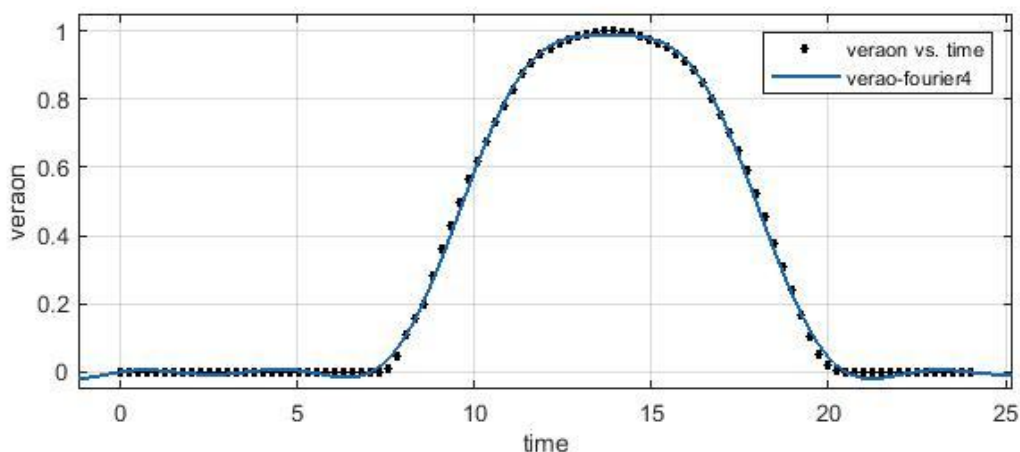
Figura 04 - Representação da curva de verão por regressão polinomial grau 8.





Ao analisar as Figuras 03 e 04 pode-se perceber que a função encontrada, representada pela linha azul no gráfico, apresenta um erro significativo em ambos os casos. Não é possível uma correspondência exata da curva original. Na função polinomial de grau 7 tem-se 98,86% de correspondência e na Polinomial de Grau 8 tem-se 99%. Em busca de reduzir a margem de erro, foi aplicado a função de Fourier de grau 4, nesse mesmo gráfico. Mas principalmente ela diverge significativamente nos períodos noturnos onde não há geração de energia. Assim, foi realizada a regressão a partir de uma série de fourier de grau 4, e os resultados são apresentados na Figura 05.

Figura 05 - Representação da curva de verão por série de Fourier grau 4.



Observa-se no resultado obtido que ao se aplicar Fourier de grau 4 já é possível observar que além de se obter uma função com correspondência de 99,91%, os períodos noturnos estão contemplados de forma adequada na modelagem proposta. A função que representa portanto, de forma acurada essa curva é:

$$f(x) = a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \text{sen}(x * w) + a_2 * \cos(2 * x * w) + b_2 * \text{sen}(2 * x * w) + a_3 * \cos(3 * x * w) + b_3 * \text{sen}(3 * x * w) + a_4 * \cos(4 * x * w) + b_4 * \text{sen}(4 * x * w)$$

Com os seguintes coeficientes:

$$a_0 = 0.3603 \quad (0.3517, 0.3689);$$

$$a_1 = -0.4054 \quad (-0.4333, -0.3776);$$

$$b_1 = -0.3563 \quad (-0.3947, -0.3179);$$

$$a_2 = 0.02181 \quad (-0.01033, 0.05395);$$

$$b_2 = 0.1779 \quad (0.1701, 0.1857);$$

$$a_3 = -0.02394 \quad (-0.0376, -0.01027);$$



$$b_3 = 0.03496 \quad (0.03146, 0.03846);$$

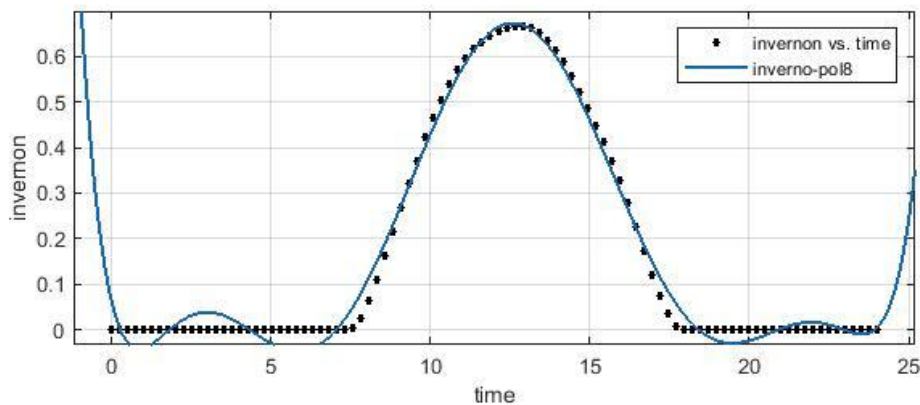
$$a_4 = 0.04788 \quad (0.04431, 0.05145);$$

$$b_4 = -0.01186 \quad (-0.02952, 0.005807);$$

$$w = 0.2798 \quad (0.2735, 0.2861).$$

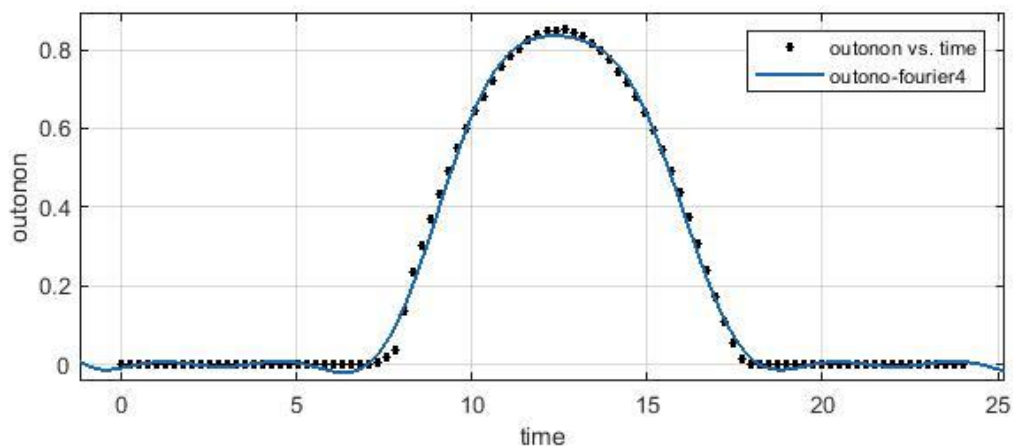
Na sequência, na Figura 06, é apresentada a regressão polinomial de grau 8 para o período de outono e tal como na modelagem anterior, apesar de um erro relativamente baixo a acurácia do modelo fica aquém do esperado.

Figura 06 - Representação da curva de outono através de regressão polinomial de grau 8.



Assim, para a função polinomial de grau 8, no outono, é encontrada uma correspondência de 98,88%. Na figura 8 é realizada a regressão também para o período de outono através de série de fourier.

Figura 07 - Representação da curva de outono por série de Fourier grau 4.





Como pode-se observar na Figura 07, para a função de Fourier de grau 4, no outono, é encontrada uma correspondência de 99,79%. E a seguinte função representa matematicamente esse modelo:

$$f(x) = a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \text{sen}(x * w) + a_2 * \cos(2 * x * w) + b_2 * \text{sen}(2 * x * w) + a_3 * \cos(3 * x * w) + b_3 * \text{sen}(3 * x * w) + a_4 * \cos(4 * x * w) + b_4 * \text{sen}(4 * x * w)$$

Com os seguintes coeficientes:

$$a_0 = 0.2882 \quad (0.2785, 0.2979);$$

$$a_1 = -0.2564 \quad (-0.2989, -0.2139);$$

$$b_1 = -0.359 \quad (-0.3965, -0.3214);$$

$$a_2 = -0.04961 \quad (-0.08476, -0.01446);$$

$$b_2 = 0.1563 \quad (0.1327, 0.18);$$

$$a_3 = -0.02117 \quad (-0.03089, -0.01146);$$

$$b_3 = 0.001926 \quad (-0.005035, 0.008886);$$

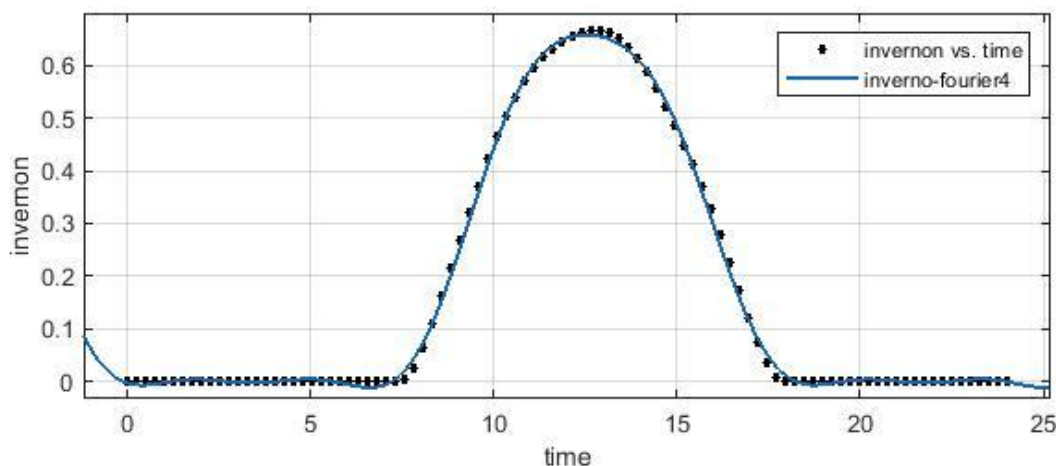
$$a_4 = 0.02958 \quad (0.01567, 0.0435);$$

$$b_4 = 0.02329 \quad (0.009391, 0.0372);$$

$$w = 0.3265 \quad (0.3165, 0.3366).$$

Considerando que a regressão polinomial conforme pode ser observado até aqui, apresenta resultados inferiores aos obtidos pela série de Fourier, a partir de agora serão apresentados apenas os modelos obtidos por esse método. Nesse sentido, na Figura 08 são apresentados os dados modelados para o Inverno.

Figura 08 - Representação da Curva de Inverno através de Fourier grau 4.





Para a função de Fourier de grau 4, no inverno, é encontrada uma correspondência de 99,90%. Com isso, é obtido a seguinte função:

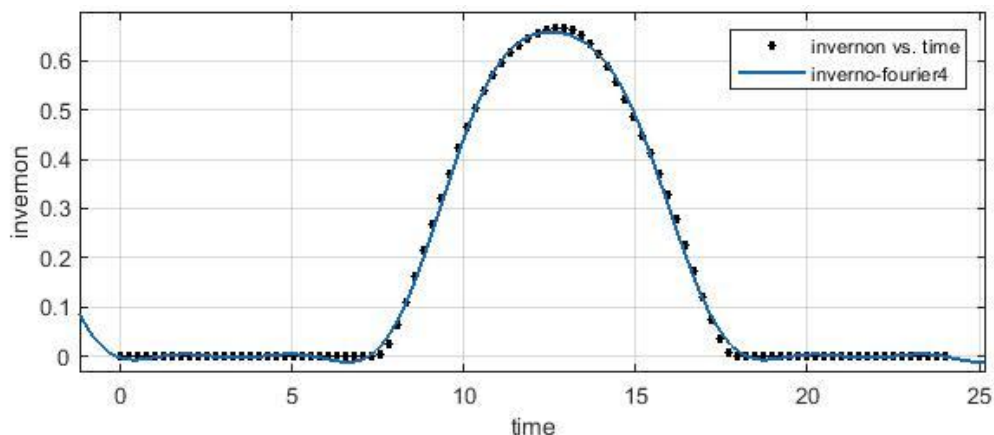
$$f(x) = a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \sin(x * w) + a_2 * \cos(2 * x * w) + b_2 * \sin(2 * x * w) + a_3 * \cos(3 * x * w) + b_3 * \sin(3 * x * w) + a_4 * \cos(4 * x * w) + b_4 * \sin(4 * x * w)$$

Com os seguintes coeficientes:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.2253 \quad (0.2205, 0.2302); \\ a_1 &= -0.1294 \quad (-0.1554, -0.1034); \\ b_1 &= -0.3175 \quad (-0.3313, -0.3037); \\ a_2 &= -0.08855 \quad (-0.1004, -0.0767); \\ b_2 &= 0.0905 \quad (0.0714, 0.1096); \\ a_3 &= -0.01008 \quad (-0.01316, -0.007); \\ b_3 &= -0.007369 \quad (-0.01207, -0.00267); \\ a_4 &= -0.0007518 \quad (-0.009506, 0.008003); \\ b_4 &= 0.02443 \quad (0.0218, 0.02707); \\ w &= 0.3421 \quad (0.3354, 0.3489). \end{aligned}$$

Na Figura 09 é apresentada a modelagem para a função de Fourier de grau 4, na primavera, onde é encontrada uma correspondência de 99,94%.

Figura 09 - Representação da Curva de Primavera através de Fourier grau 4.



Fonte: Autor.

A curva apresentada na Figura 09 é obtida a partir da seguinte função:



$$f(x) = a_0 + a_1 * \cos(x * w) + b_1 * \text{sen}(x * w) + a_2 * \cos(2 * x * w) + b_2 * \text{sen}(2 * x * w) + a_3 * \cos(3 * x * w) + b_3 * \text{sen}(3 * x * w) + a_4 * \cos(4 * x * w) + b_4 * \text{sen}(4 * x * w)$$

Com os seguintes coeficientes:

$$a_0 = 0.2052 \quad (0.1999, 0.2104);$$

$$a_1 = -0.2829 \quad (-0.2918, -0.2741);$$

$$b_1 = -0.1315 \quad (-0.159, -0.1039);$$

$$a_2 = 0.07549 \quad (0.05509, 0.09589);$$

$$b_2 = 0.08801 \quad (0.07913, 0.09688);$$

$$a_3 = 0.0009363 \quad (-0.001589, 0.003461);$$

$$b_3 = 0.01116 \quad (0.005827, 0.0165);$$

$$a_4 = 0.00474 \quad (-0.003193, 0.01267);$$

$$b_4 = -0.02226 \quad (-0.02601, -0.0185);$$

$$w = 0.29 \quad (0.2826, 0.2975).$$

Conforme pode ser observado, a partir dos dados obtidos foi possível realizar a modelagem matemática da capacidade/potencial de geração de energia fotovoltaica na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Nesse sentido, esses modelos agora poderão auxiliar na análise e estudos principalmente de gerenciamento de demanda a partir do consumo bem como na avaliação da utilização desta tecnologia na zona rural.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada uma proposta da modelagem matemática da capacidade/potencial de geração de energia fotovoltaica na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul ao longo do ano. Nesse sentido conclui-se que a realização de uma regressão polinomial tanto de grau 7 ou 8, apesar de representar matematicamente com um erro pouco significativo, não representa com acurácia o efeito fotovoltaico, principalmente nos período sem geração (noite). Ao aplicar a regressão através da função de Fourier, de grau 4, o resultado, mesmo com um grau relativamente baixo, apresenta uma acurácia maior que 99% além de representar de forma adequada o comportamento da geração em cada um dos períodos. Essa melhora no desempenho ocorre uma vez que a série de Fourier se utiliza de somas de funções senos e



cossenos de diferentes amplitudes e frequências, sendo possível anular algumas regiões do gráfico que não possuem geração de energia além de descrever melhor seus períodos de geração. Como estudos futuros a modelagem realizada deverá ser estendida para um conjunto ainda maior de instalações de forma a validar a metodologia aplicada. além disso a partir de dados meteorológicos tentar quantificar as perdas/redução da capacidade de geração por sombreamento (i.e. períodos nublados) e dias chuvosos, onde há uma significativa redução no potencial de energia fotovoltaica.

AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem o apoio financeiro da FAPERGS, do DEMEI, Departamento Municipal de Energia de Ijuí e do GAIC pela disponibilização de infraestrutura e dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MILLIGAN, S. R.; HOLT, W. V.; LLOYD, R. “**Impacts of climate change and environmental factors on reproduction and development in wildlife**”. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1534, p. 3313–3319, 2009. ISSN 0962-8436. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rstb.2009.0175>>. Acesso em 04 de agosto de 2021.
- BRASIL, ANEEL. **Resolução ANEEL nº 687 de 24 de novembro de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em 04 de agosto de 2021.
- PROCLIMA. “**Gases do efeito estufa**”. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/#:~:text=CO2%20%E2%80%93%20Respons%C3%A1vel%20por%20cerca%20de,e%20sumidouros%2C%20que%20tem%20a>>. Acesso em 04 de agosto de 2021.
- INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, INEE. “**O que é Geração Distribuída**”. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em 04 de agosto de 2021.
- ZILLES, Roberto et al. “**Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede Elétrica**”. 1º ed. São Paulo. Oficina de textos, 2012. 208 p.



Canal Rural. “**Vale a pena investir em energia solar na propriedade rural?**”. Disponível em:

<<https://www.canalrural.com.br/noticias/vale-a-pena-investir-em-energia-solar-na-propriedad-e-rural/>>. Acesso em 05 de agosto de 2021.