



Avaliação de Desempenho em Plantas Fotovoltaicas de Geração de Energia Elétrica

Performance Evaluation in Photovoltaic Power Generation Plants

Bruno Duarte *, Marcelo Teixeira†

RESUMO

Em geração de energia fotovoltaica, desempenho é um aspecto crítico, que pode ser revelado após a construção e o monitoramento do sistema real. Porém, isso inviabiliza a análise preditiva do sistema. Neste trabalho, propõe-se um modelo em Redes de Petri para antecipar, com razoável precisão, o desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes tamanhos, arquiteturas, perfis de geração e estágios de implantação. Por receber um conjunto de especificações coletadas off-line, a abordagem permite explorar o sistema modelado sem efetivamente construí-lo ou medi-lo. A acurácia das estimativas providas é testada por meio de um experimento envolvendo uma planta fotovoltaica real e os resultados mostram uma precisão de 93,4% em comparação com o sistema real.

Palavras-chave: Redes de Petri. Geração de Energia. Desempenho.

ABSTRACT

In photovoltaic power generation, performance is a critical aspect, which can be revealed after building and monitoring the actual system. However, this makes predictive analysis of the system unfeasible. In this work, a Petri Nets model is proposed to anticipate, with reasonable precision, the performance of photovoltaic systems with different sizes, architectures, generation profiles and implementation stages. By receiving a set of specifications collected offline, the approach allows exploring the modeled system without actually building or measuring it. The accuracy of the estimates provided is tested through an experiment involving a real photovoltaic plant and the results show an accuracy of 93.4% compared to the real system.

Keywords: Petri Nets. Power Generation. Performance.

1 INTRODUÇÃO

Uma questão importante em geração de energia *fotovoltaica* FV, é revelar possíveis flutuações que podem atrapalhar o desempenho do sistema (JANA; CHAKRABORTY, 2020; OLIVARES; CAÑIZARES; KAZERANI, 2014). Essa habilidade permite aos gestores de energia negociar a produção a priori, seja para decidir sobre um possível armazenamento local, seja para negociar a venda do excedente para a rede elétrica principal, ou seja para complementar a energia gerada quando a produção local for insuficiente.

As possíveis flutuações na geração podem ser facilmente reveladas monitorando-se a infraestrutura real do sistema. No entanto, essa alternativa pressupõe que um sistema esteja em operação para ser medido, e, além disso, está longe de permitir a antecipação de informações para as etapas de planejamento, contingenciamento e

* Engenharia de Computação; brunoduarte@alunos.utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-9750-6301>.

† Departamento Acadêmico de Informática; mtex@utfpr.edu.br; <https://orcid.org/0000-0002-1008-7838>.



correções preditivas. Essas etapas são mais beneficiadas por abordagens de modelagem e simulação que não dependem necessariamente da infraestrutura física (PAULISTA; PEIXOTO; ASSIS RANGEL, 2019).

Em trabalhos anteriores, (R. MASCHIO et al., 2020) exploram a hipótese de que um sistema de geração de energia pode ser visto, em certo nível de abstração, como um *Sistema a Eventos Discretos* (SED) (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008), para então ser modelado e controlado como tal, usando mecanismos baseados no design e no processamento de eventos. Duas abordagens foram propostas e testadas, uma para a análise de disponibilidade, usando *Redes de Petri* (SIMON; TEIXEIRA; COSTA, 2021), e outra mais focada no controle dos elementos ciber-físicos do sistema, nesse caso usando *Máquinas de Estados Finitos* (R. MASCHIO et al., 2020).

Considerando os resultados apresentados em (SIMON; TEIXEIRA; COSTA, 2021), este trabalho busca responder a seguinte questão: “É possível realizar a avaliação de desempenho do sistema adicionalmente a análise de sua disponibilidade?” Para investigar tal questão, propõe-se uma abordagem por meio de um modelo baseado em *Generalised Stochastic Petri Nets* (GSPN).

Uma GSPN (KARTSON et al., 1995) trata-se de uma expansão dos modelos clássicos de Redes de Petri (MURATA, 1989), que, além de ser um formalismo consolidado de modelagem que permite expressar e avaliar propriedades intrínsecas de SEDs, como paralelismo, concorrência, exclusão mútua, etc. permite representar o tempo usando variáveis aleatórias associadas à *transições temporizadas*, que podem ser combinadas entre si ou com transições *não temporizadas* (ou *imediatas*) (DESROCHERS, 1994).

O modelo proposto pode ser diretamente combinado aos resultados anteriores e reconfigurado para projetar uma série de diferentes fluxos de trabalho em geração FV, além de incorporar o efeito encadeado das variáveis que normalmente oscilam em sistemas FV. Como o modelo é alimentado com parâmetros de especificações off-line, ele não depende do sistema FV real para ser simulado.

A fim de testar a abordagem proposta, foi avaliado o desempenho de uma planta FV real, instalada na UTFPR, em Pato Branco, PR, Brasil. Inicialmente, foi considerada a análise de um único painel FV, o que é estendido em um segundo momento para um conjunto de 156 painéis. Para cada cenário, foram coletadas estimativas que visam antecipar como o sistema tende a responder a um conjunto de variabilidades impostas. As estimativas são então comparadas com os índices de desempenho do sistema real.

Os resultados sugerem que diversas métricas de interesse podem ser estimadas em um curto espaço de tempo, para sistemas FV com diferentes tamanhos, arquiteturas, perfis de geração e estágios de construção, o que acaba sendo uma ferramenta valiosa para engenharia preditiva de energia.

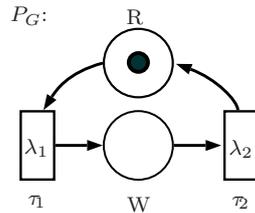
A seguir, a Seção 2 apresenta o modelo GSPN proposto; a Seção 3 descreve os experimentos e, por fim, a Seção 4 discute algumas conclusões e perspectivas futuras.

2 METODOLOGIA

Em tese, um painel FV deve receber a irradiação solar, absorve-la e fornecer eletricidade. Entretanto, existem algumas variáveis neste processo que interferem no desempenho da geração de energia. Dentre elas: a irradiação solar é continuamente variável; cada painel possui uma capacidade constante e específica de produção; e a quantidade de energia a ser modelada e estimada deve ser associada a um determinado período de tempo, pois deseja-se interceptar essa estimativa em pontos discretos de tempo. Esses aspectos são absorvidos pela GSPN P_G , apresentada na Figura 1.

Estruturalmente, o modelo P_G é simples e intuitivo. A parte mais delicada está na forma como suas variáveis internas se relacionam. O modelo é composto por dois lugares, R e W, conectados pelas transições temporizadas

Figura 1 – Modelo em GSPN para um gerador de energia FV.



Fonte: Autoria própria (2021)

τ_1 e τ_2 . R quantifica os *recursos (tokens)* disponíveis para a geração de energia, enquanto W modela o estado *gerando*, ou seja, a energia que está sendo produzida. τ_1 e τ_2 impõem transições (mudanças) de estado em P_G usando *tokens* em R e W , e *disparando* após os respectivos atrasos λ_1 e λ_2 .

A transição τ_1 dispara a uma taxa $1/\lambda_1$, em que λ_1 é seu atraso, enquanto τ_2 tem uma taxa de disparo de $1/\lambda_2$. O atraso λ_2 também representa o tempo que o gerador leva para produzir uma determinada porção de energia. Neste artigo, define-se $M(R) = 1$ em P_G , a fim de modelar geradores produzindo sequencialmente, uma unidade de energia por vez, após um atraso $\lambda_2 \geq \lambda_1$.

Desta forma, diferentes potenciais de geração podem ser reproduzidos em um curto período de tempo simplesmente variando λ_2 , ou configurando fluxos de trabalho que conectam vários modelos P_G . Isso permite capturar perfis distintos de plantas FV, bem como mudanças climáticas e ambientais, como sombreamento dos painéis, oscilação de temperatura, intensidade do vento (quando for o caso), etc. Observe que esses eventos são reportados por sensores que se integram aos geradores no ambiente de produção e são usados para calcular parâmetros para λ_2 , conforme a Eq. (1):

$$\lambda_2 = \frac{\Delta R_M}{(R_M - \min(R_M))} \times T \quad (1)$$

em que R_M é o *recurso* real (medido); $\Delta R_M = \max(R_M) - \min(R_M)$ define a faixa viável de recursos que um gerador produz (neste caso, ΔR_M é a irradiação solar, então $\min(R_M)$ e $\max(R_M)$ representam, respectivamente, a irradiação mínima ($100W/m^2$) e máxima ($1000W/m^2$) para a operação do painel); e T é o intervalo de observação.

A seguir, esse modelo é simulado a fim de estimar algumas métricas que podem beneficiar e acelerar o processo de tomada de decisões de caráter preditivo na geração e gestão de energia. Por exemplo, pode ser interessante saber se a usina é capaz de suprir uma determinada demanda em um intervalo de tempo especificado.

Usando o modelo proposto, respostas para essas questões podem ser obtidas simplesmente variando-se os valores de λ_2 em P_G , conforme ilustrado na próxima seção.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi conduzido um estudo de caso envolvendo um sistema FV real, com 420 kW de potência máxima, instalado na *Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)*, em Pato Branco, PR, Brasil. A planta instalada, é composta por 1237 painéis, distribuídos em diferentes blocos de edifícios. Os painéis de cada bloco formam *strings*, que são centralizadas por inversores, responsáveis pela conversão de energia contínua em alternada. Cada *string* é conectada a um *Maximum Power Point Tracker (MPPT)*, responsável por manter a máxima geração de energia proveniente dos painéis, através do controlador de corrente, mesmo em baixas tensões.



Para uma análise mais objetiva e clara do modelo proposto, o sistema real foi observado em duas etapas. Inicialmente, observou-se a operação de um único painel de 340 W, o que se acredita ser a análise de desempenho mais básica possível sobre um sistema FV. Em um segundo momento, após a validação do modelo para um único painel, a análise foi expandida para a observação de um inversor completo, composto por 8 *strings* que, juntas, instalam 156 painéis de 340 W cada.

A irradiação solar (denotada a seguir por $S(W/m^2)$) é reportada a cada 5 minutos por sensores instalados próximos a cada inversor do sistema. Esses dados são usados para calcular (pela Equação (1)) os parâmetros de entrada para o modelo GSPN da Figura 1.

O modelo calibrado é então simulado com o objetivo de antecipar a potência a ser eventualmente produzida pelos painéis. Todas as simulações neste artigo usam o algoritmo *Stationary Simulation Standard* implementado pela ferramenta *TimeNet* (ZIMMERMANN; KNOKE, 2007), considerando um nível de confiança de 95 %, e erro relativo de 10 %.

Então, a taxa de disparo da transição τ_2 foi variada, com o objetivo de estimar o *Tempo de Resposta*:

$$RT(W) = (\mathcal{E}(W)) \cdot (1/\lambda_2), \quad (2)$$

representando o tempo necessário para produzir certa quantidade de energia, em que

$$\mathcal{E}(W) = (\#W), \quad (3)$$

captura a *expectativa* média de marcação no lugar W, enquanto RT confronta essa expectativa com a frequência de disparos, o retornando o tempo médio de espera em W.

A variável T está associada a 3600s, o que significa a geração de energia no período de uma hora. Quando $S \geq 1000 W/m^2$, o atraso λ_2 é definido como $\lambda_2 = 3600 s$ que retorna a produção máxima de potência. Também $\lambda_1 = 3600 s$ é definido como o $\min(\lambda_2)$, visto que se pretende observar somente as variações em (λ_2) .

As simulações a serem apresentadas a seguir também estão separadas em duas etapas. Na primeira etapa, foi simulada e estimada a potência produzida por um único painel FV, enquanto a segunda etapa estima a quantidade de potência resultante do inversor contando os 156 painéis.

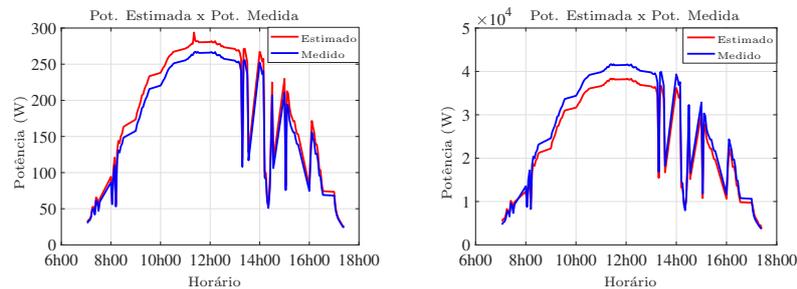
Observe que as estimativas para as *strings* de painéis têm uma natureza não aditiva em relação às estimativas de painel único, pois as condições que incidem sobre cada parte da *string* podem ser diferentes. Na verdade, é essa característica que retorna uma maior diversidade de análise sobre a quantidade real de potência resultante de um inversor.

No modelo proposto, esse efeito não aditivo é capturado pela coleta de uma amostra de parâmetros de entrada para cada painel que compõe a *string* (semelhante à primeira etapa). Em seguida, os parâmetros de entrada são derivados para toda a *string*, com base na análise dos valores da média e do desvio padrão de cada amostra. Caso o desvio padrão seja significativo, a análise pode ser dividida por *strings* para isolar setores de produção mais instáveis. Caso contrário, o que é o caso dos experimentos a seguir, o desvio padrão pode ser desprezado, por ser ínfimo e não afetar a análise consideravelmente.

Para fins de validação, em ambas as etapas, as estimativas antecipadas pelo modelo são comparadas com a potência finalmente produzida pela planta real FV e reportada ao sistema de monitoramento por telemetria. Os resultados da comparação são mostrados na Figura 2.

A comparação na Figura 2 mostra que o modelo proposto estima o volume de geração de energia com precisão de aproximadamente 93,4%, em ambos os testes, com relação ao desempenho real do sistema. Isso sugere que o modelo é preciso o suficiente para antecipar o fator de potência gerado por um painel ou uma série de painéis, absorvendo possíveis variabilidades internas.

Figura 2 – Potência Estimada x Potência Medida de geração de energia.



(a) Análise de 1 painel.

(b) Análise de 156 painéis.

Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa forma, se pode responder à algumas questões postas anteriormente na Seção 2. Supondo que a usina tenha sido solicitada pelo sistema elétrico a atender a um consumo de 38 kW de energia, em média, entre às 10:00 e 13:00 horas. Espera-se saber se a geração dos 156 painéis, dentro desse intervalo e com as condições estimadas, é suficiente para atender a essa solicitação. A partir dos resultados da Figura 3(b), podemos ver que a produção é estimada em aproximadamente 37 kW , às 10:00 horas, e então 42.1 kW , 43.6 kW e 42 kW , respectivamente às 11:00, 12:00 e 13:00 horas.

Nesse caso, é possível informar as equipes de engenharia e de gestão respeito da demanda solicitada e da produção disponível. Isso permitiria o desenvolvimento de estratégias como banco de baterias para armazenar excedentes de outros horários, ou a negociação com o operador da rede elétrica principal para solicitar o suprimento da demanda. A relação entre banco de baterias, sobras, cargas e geração do sistema, é atualmente objeto de pesquisas em andamento.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho, os componentes de um sistema de energia FV são vistos como entidades dirigidas a eventos discretos que são modeladas utilizando GSPNs. Essa abordagem permite antecipar métricas de performance para sistemas a eventos, antes mesmo de sua implementação.

O modelo proposto foi testado sobre uma planta FV real. As estimativas mostram uma aderência de aproximadamente 90% em relação ao desempenho do sistema real.

Pesquisas futuras e em andamento têm como meta estabelecer mecanismos para que as estimativas do modelo possam servir como apoio a sistemas de geração de energia cooperativos, no contexto de sistemas de energia ciber-físicos (SUPERGRID, 2021). Também se pretende testar a abordagem proposta utilizando outros sistemas de geração de energia, como usinas eólicas.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada na forma de bolsa de iniciação científica no contexto do PROGRAMA DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA NAS AÇÕES AFIRMATIVAS 2020/2021 da PROPPG/UTFPR. Estendem-se os agradecimentos também à Dierli Maiara da Rosa Maschio e ao professor Jean Patric da Costa



que também contribuíram com a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to Discrete Event Systems**. [S.l.]: Springer Science, 2008.
- DESROCHERS, A. A. **Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems: Modeling, Control and Performance Analysis**. [S.l.]: IEEE Press, 1994.
- JANA, Debashis; CHAKRABORTY, Niladri. Generalized stochastic Petri nets for uncertain renewable-based hybrid generation and load in a microgrid system. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Wiley Online Library, v. 30, n. 4, e12195, 2020.
- KARTSON, D. et al. **Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- MURATA, T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 77, p. 541–580, 1989.
- OLIVARES, Daniel E; CAÑIZARES, Claudio A; KAZERANI, Mehrdad. A centralized energy management system for isolated microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 5, n. 4, p. 1864–1875, 2014.
- PAULISTA, Cássio Rangel; PEIXOTO, Túlio Almeida; ASSIS RANGEL, João José de. Modeling and discrete event simulation in industrial systems considering consumption and electrical energy generation. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 224, p. 864–880, 2019.
- R. MASCHIO, Dierli M. da et al. Supervisory Control of Distributed Power Generation Systems with Petri Net-based Customization. In: INTERNATIONAL Workshop on Discrete Event Systems. Rio de Janeiro, Brazil: [s.n.], 2020. P. 1–6.
- SIMON, Daniel F.; TEIXEIRA, Marcelo; COSTA, Jean Patric da. Availability estimation in photovoltaic generation systems using Timed Petri Net simulation models. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, 2021. Accepted for publication.
- SUPERGRID. **SuperGrid Institute: shaping power transmission**. 2021.
- ZIMMERMANN, Armin; KNOKE, Michael. **TimeNET 4.0 - A Software Tool for the Performability Evaluation with Stochastic and Colored Petri Nets**. [S.l.], 2007. Disponível em: [🔗](#).