

ALGORITMO GENÉTICO PARA ESTIMAÇÃO DO POTENCIAL FOTOVOLTAICO DE UMA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA: UM ESTUDO DE CASO PARA A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Douglas Aurélio Carvalho Costa (UNI7) E-mail: douglas.aurelio84@gmail.com

Arthur Plínio de Souza Braga (UFC) E-mail: arthurp@dee.ufc.br

Paulo Cesar Marques de Carvalho (UFC) E-mail: carvalho@dee.ufc.br

Fellipe Souto Soares (UFC) E-mail: fellipe@dee.ufc.br

Francisco Jeandson Rodrigues da Silva (UFC) E-mail: jeandson@dee.ufc.br

Obed Leite Vieira (UFC) E-mail: obedvieira@gmail.com

Pollyana Rodrigues de Carvalho (UNI7) E-mail: pollycr94@gmail.com

Resumo: Neste artigo é usado um algoritmo genético (AG) para estimar o potencial fotovoltaico (FV) de uma geração distribuída (GD) FV com potência instalada de 1,5 kWp, conectada à rede de distribuição de energia elétrica, na região nordeste do Brasil, mais especificamente em Fortaleza, Ceará. Foram coletados dados ambientais de irradiação global e temperatura ambiente nas proximidades da GD FV, além de dados da potência instântanea da GD FV instalada na zona urbana de Fortaleza. Foi estimada com o AG a potência média diária para dias com condições favoráveis, alta irradiação (6,23 kWh/m²), e condições desfavoráveis, baixa irradiação (3,99 kWh/m²), sendo-se, assim, possível estimar a geração de eletricidade através da GD FV, sendo constatados erros percentuais nesta estimativa de -1,90% e 11,86%, respectivamente.

Palavras-chave: Algoritmo Genético, Geração Distribuída Fotovoltaica, Energia Solar, Irradiação.

GENETIC ALGORITHM FOR ESTIMATING THE PHOTOVOLTAIC POTENTIAL OF A PHOTOVOLTAIC DISTRIBUTED GENERATION: A CASE STUDY FOR THE NORTHEAST REGION OF BRAZIL

Abstract: In this paper, a genetic algorithm (GA) is used to estimate the photovoltaic (PV) potential of a PV distributed generation (DG) with an installed power of 1.5 kWp, connected to the electric power distribution network, in northeastern Brazil, more specifically in Fortaleza, Ceará. Environmental data were collected from global irradiance and ambient temperature in the vicinity of the PV DG, in addition to data of the instantaneous power of the PV DG installed in the urban area of Fortaleza. The average daily power for days with favorable conditions, high irradiation (6.23 kWh/m²), and unfavorable conditions, low irradiation (3.99 kWh/m²) was estimated with the GA, thus, it is possible to estimate the generation of electricity through PV DG, with percentage errors in this estimate of -1.90% and 11.86%, respectively.

Keywords: Genetic Algorithm, Photovoltaic Distributed Generation, Solar Energy, Irradiation.

1. Introdução

A matriz energética brasileira é centralizada e não diversificada, com a oferta interna de energia elétrica predominantemente hidráulica, sendo esta fonte responsável por 68,1% desta oferta (EPE, 2017).

Desde a criação da Resolução Normativa nº 482/2012, alterada pela Resolução Normativa nº 687/2015, que criou as condições de acesso da micro e mini geração

distribuída (GD) à rede de distribuição de energia elétrica da concessionária local e do sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012; ANEEL 2015), as fontes renováveis, principalmente a fonte solar, estão ganhando espaço nos centros urbanos e, desta forma, descentralizando a geração de energia elétrica, trazendo a geração de eletricidade para perto dos centros consumidores.

Em 2016, a micro e a mini GD atingiram uma geração de eletricidade de 104,1 GWh com uma potência instalada de 72,4 MW, somente a GD fotovoltaica (FV) atingiu 53,6 GWh, tendo sido instalado uma potência de 56,9 MW (EPE, 2017).

Com este crescimento desenfreado da GD FV tornou-se necessário estudos de novos métodos ou aperfeiçoamento de modelos que sejam adequados à estimativa do potencial FV de uma região, além da necessidade de se escolher módulos FV, dentre as várias tecnologias existentes, mais adequados para o local da instalação.

O modelo de parâmetro 4 (M4P) e o modelo de 5 parâmetros (M5P), já consolidados na literatura, tentam modelar matematicamente a célula FV através de um modelo de único diodo. Madi e Kheldoun (2018) fizeram uma análise comparativa entre estes dois modelos e o modelo ideal de um único diodo, sendo que o M5P obteve o resultado mais preciso, com erro de 0,0011% para um módulo de 50 W.

Vieira *et al* (2018) comparou duas metodologias para estimar a geração de eletricidade para uma planta FV conectada à rede da ENEL, na cidade de Fortaleza, sendo considerados os modelos PVUSA e um modelo proposto por Dias *et al* (2017), ambos com base em regressão múltipla, obtendo-se que o modelo PVUSA não é adequado para a região de Fortaleza, com erros em torno de 20%, sendo o erro médio do modelo proposto por Dias *et al* (2017) estando próximo de 3,4%.

Para este trabalho é usado um algoritmo genético (AG), com o modelo proposto por Dias *et al* (2017) como parte principal da função objetivo, para estimar o potencial de uma GD FV conectada à rede de distribuição de eletricidade. Esta otimização da estimativa do potencial FV, com o uso do AG, busca a melhor solução para o problema proposto através da minimização de uma função erro.

2. Metodologia

Usando-se AG para estimar o potencial FV de um sistema de GD FV instalado no Laboratório de Energias Alternativas (LEA) da Universidade Federal do Ceará (UFC) através de dados de irradiação solar no plano horizontal e temperatura ambiente, ambas as medições sendo feitas nas proximidades da GD FV, que é composta por painéis Si-p.

2.1. Materiais utilizados

2.1.1. Localização da GD FV

A presente pesquisa é validada através de um sistema de GD FV, instalado no LEA-UFC, conectado à rede elétrica de distribuição de baixa tensão (BT) monofásica do Campus do Pici, com tensão nominal de 220 V. O sistema FV é composto por painéis de Si-p, tem potência nominal de 1,5 kWp, rendimento em torno de 0,92 e funciona em um sistema de compensação de energia.



Figura 01 – GD FV de 1,5 kWp instalada no LEA-UFC.

2.1.2. Sistema de aquisição de dados ambientais

A aquisição de dados de temperatura ambiente (T_{dados}) e irradiação (G_{dados}) foram feitas utilizando-se sensor de temperatura PT-100 e piranômetro de modelo LP02, com incertezas nas medições em torno de 2,5% e 1,8%, respectivamente. Os sensores são conectados ao Controlador Lógico Programável (CLP), modelo Twido TWDLC-E40DRF, que é conectado a uma *Central Processing Unit* (CPU) com um monitor, a qual tem um sistema SCADA instalado. Os dados coletados podem ser exportados no formato .xls.

2.1.3. Sistema de aquisição de dados da GD FV

Para validar o potencial FV estimado neste trabalho foi necessário instalar um sistema de aquisição de dados e monitoramento da GD FV instalada no LEA.

O *Datalogger*, elemento principal deste sistema, tem uma comunicação com o inversor através de uma ligação via RS485. O sistema transmite automaticamente os dados ao servidor web via internet, podendo ser exportados no formato .xls.

É mostrado na Figura 02 o fluxograma de aquisição dos dados ambientais e dos dados da GD FV.

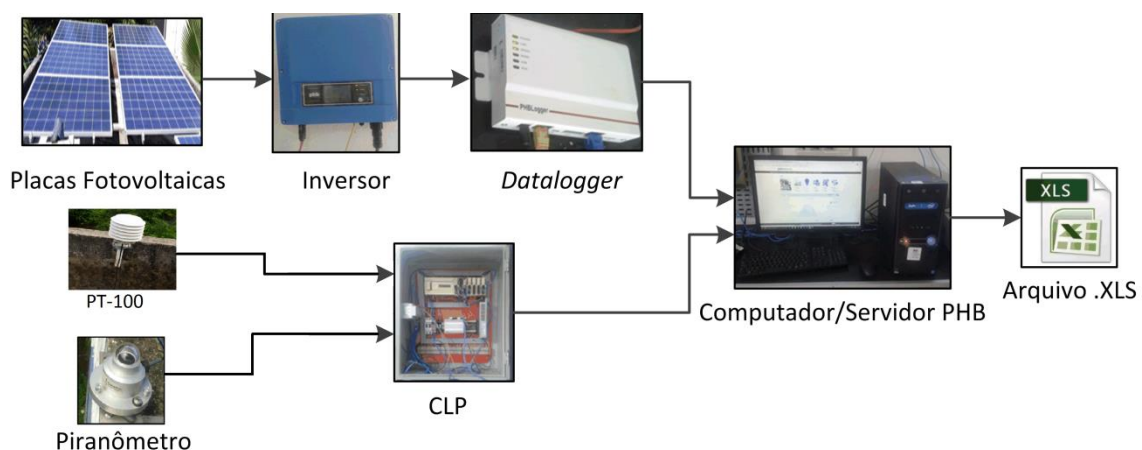


Figura 02 – Sistema de aquisição de dados ambientais e da GD FV.

2.2. Modelo de estimativa do potencial FV

A modelo escolhido foi proposto por Dias *et al*, que é descrito pela Equação (1), pois tem dependência apenas de fatores ambientais e pode ser utilizado para estimar o potencial FV de uma região sem a necessidade de um sistema físico instalado, além de ter uma boa representatividade deste potencial para a cidade de Fortaleza (Vieira *et al*, 2018), local em que a GD FV está instalada:

$$P = aG + b \left(\frac{G}{T_a} \right)^2 + cGT_a \quad (01)$$

Em que P é a potência de saída do sistema em W, G é área de irradiação em W/m^2 , T_a é a temperatura ambiente em $^{\circ}C$ e a , b e c são os coeficientes de regressão que variam de acordo com cada tipo de tecnologia.

2.3. Algoritmo genético

Os AG's são métodos de otimização computacionais, inspirados na teoria da evolução das espécies. O AG manipula uma população de indivíduos aleatórios com um número pré-definido, sendo estes indivíduos possíveis soluções do problema. Cada indivíduo é representado por um código genético, chamado de cromossomo, que podem ser representados por uma sequência de bits de comprimento fixo (Liden, 2008).

Portanto, neste trabalho, foi considerado que a população é composta por dois tipos de indivíduos, G e T_a , sendo os valores destes indivíduos representados pelos cromossomos. A função que avalia o indivíduo é a o método usado pelo AG de mensurar a aptidão dos indivíduos, logo, indivíduos com melhores valores da função objetivo possuem a maior chance de sobrevivência.

A otimização da função objetivo é realizada através da evolução da população através da avaliação da função objetivo a cada geração, sendo aplicados, a cada geração, os operadores básicas de seleção, cruzamento e mutação. O operador cruzamento combina pares de indivíduos aleatoriamente, produzindo filhos que podem sofrer ou não mutação, sendo os indivíduos mais aptos selecionados para a próxima geração. Portanto, as populações evoluem através de sucessivas gerações até encontrar a solução ótima (Soares, 2017).

2.4. Função objetivo

O AG funciona em busca de uma minimização da função erro, que é composta pelo erro da irradiação achada pela AG (G_{AG}) em W/m^2 em relação à G medida, Equação (2), pelo erro da temperatura ambiente achada pela AG (T_{AG}) em $^{\circ}C$ em relação à T_a medida, Equação (3) e pelo erro da potência de saída da GD FV P_b em W, Equação 4, considerando-se o rendimento do sistema (η), e a margem de erro nas medições dos equipamentos, em relação à P , Equação (5).

$$erroG = \frac{|G_{dados} - G|}{G_{dados}} \quad (02)$$

$$erroT = \frac{|T_{dados} - T|}{T_{dados}} \quad (03)$$

$$P_e = \eta [a(G + kG) + b \left(\frac{(G+kG)}{(T_a+zT_a)} \right)^2 + c(G + kG)(T_a + zT_a)] \quad (04)$$

$$erroP = \frac{|P - P_e|}{P} \quad (05)$$

Em que k é a margem de erro nas medições do piranômetro e z é a margem de erro do sensor de temperatura (PT-100).

Portanto, o erro ponderado a ser minimizado é dado pela Equação (06), em que d , e e f são os pesos atribuídos a cada elemento que compõem a esta ponderação, sendo estes determinados heurísticamente.

$$erro = d \text{ erro}G + e \text{ erro}T + f \text{ erro}P \quad (06)$$

3. Resultados

A análise do potencial FV é feita com base em dois dias, sendo um dia com alta A irradiação global e um dia com baixa irradiação global, assim, busca-se observar o comportamento desta metodologia para casos em que se têm boas condições para geração de energia elétrica e casos em que as condições para esta geração são menos favoráveis.

3.1. Dia com condições favoráveis à geração de eletricidade através da GD FV

O dia analisado para as condições favoráveis de geração de energia elétrica através da GD FV foi o dia 01/12/2017, tendo neste dia a GD FV potência média de 562,16 W, irradiação média diária de 6,93 kWh/m² e temperatura ambiente média de 30,95 °C, sendo estas medições feitas no horário entre 5:20 h as 17:30 h, período de 12 h e 20 minutos, logo, tendo o sistema gerado eletricidade em torno de 7,07 kWh.

Na Figura 03 são mostradas as curvas da potência instantânea da GD FV e a curva de irradiância solar no dia 01/12/2017, percebe-se que a curva da potência instantânea tende a seguir a curva da irradiância solar.

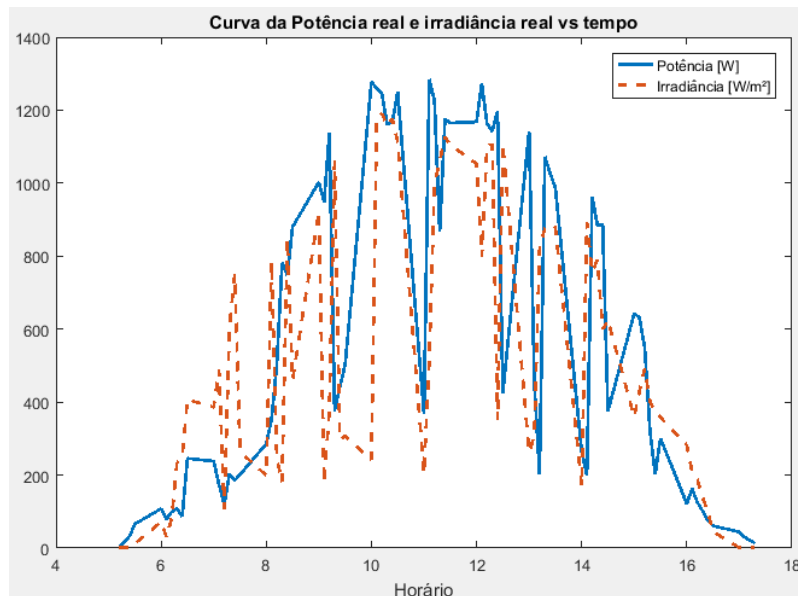


Figura 03 – Curva da potência instantânea da GD FV e da Irradiância solar do dia 01/12/2017.

As curvas da irradiância do dia 01/12/2017, assim como a curva da irradiância traçada pelo AG, Figura 04, foram bastante similares, tendo-se neste dia uma irradiação média diária calculada pelo AG de 6,21 kWh/m², valor que difere da irradiação medida, segundo a Equação (2), em apenas 0,32%.

A temperatura ambiente do dia 01/12/2017 teve um valor similar a temperatura ambiente calculada pelo AG, diferindo, segundo a Equação (3), apenas 0,10%. É mostrado na Figura 05 que, apesar da estimativa da temperatura média ser exata, os valores pontuais são de difícil convergência, portanto, sendo menos precisos, principalmente ao nascer e ao pôr do sol, momentos em que a irradiação global é menor.

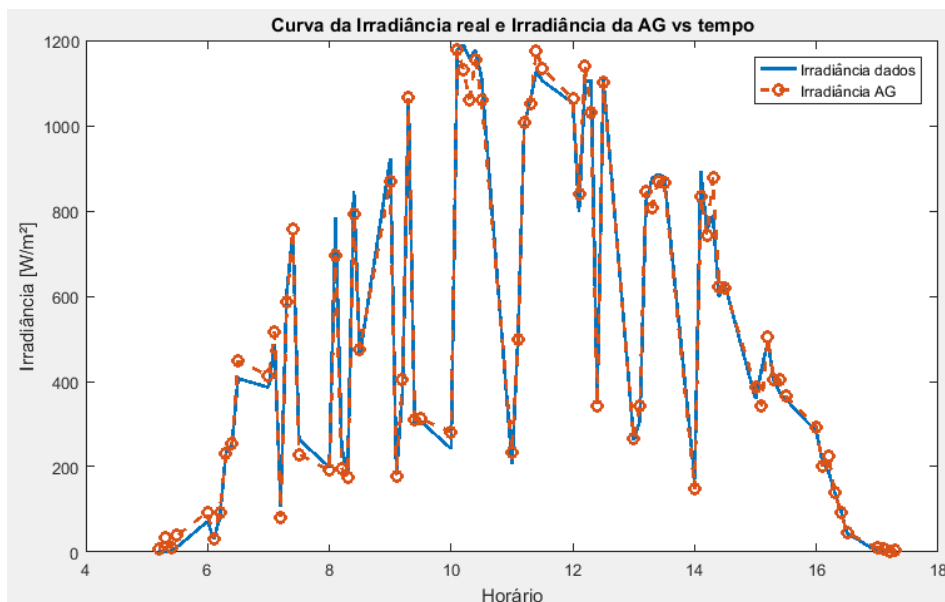


Figura 04 – Curva da Irradiância solar e da Irradiância do AG do dia 01/12/2017.

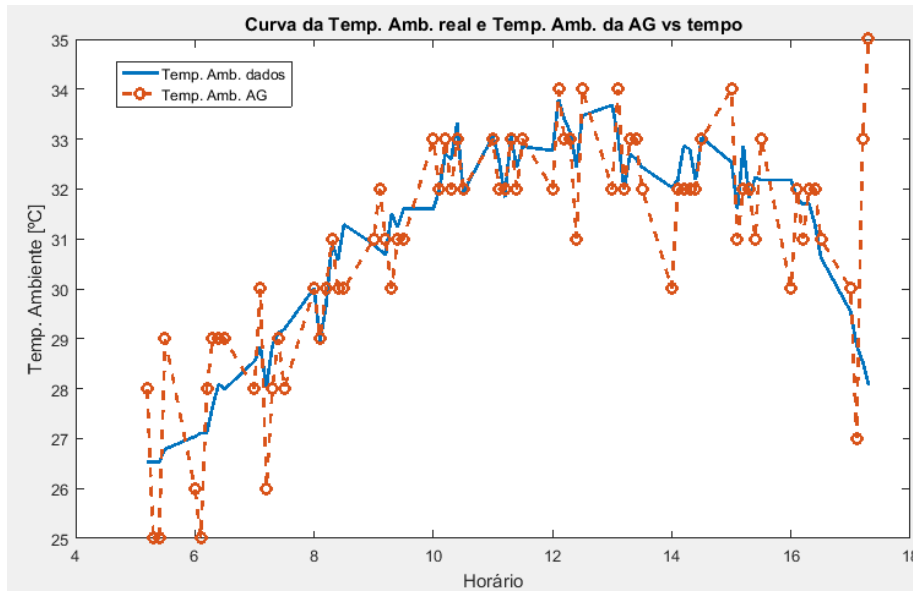


Figura 05 – Temperatura ambiente próxima à GD FV e temperatura ambiente do AG no dia 01/12/2017.

A potência média da GD FV no dia 01/12/2017 foi de 562,16 W, sendo estimado pelo AG um valor de potência média de 572,84 W, tendo uma diferença, conforme a Equação (5), de -1,90% do valor real. A estimativa da potência FV é exata e pode ser considerada precisa durante quase todo o dia, tendo um menor grau de precisão ao amanhecer, como mostrado na Figura 06. A geração de eletricidade da GD FV neste dia foi de 6,93 kWh, tendo o AG previsto uma geração de eletricidade de 7,07 kWh.

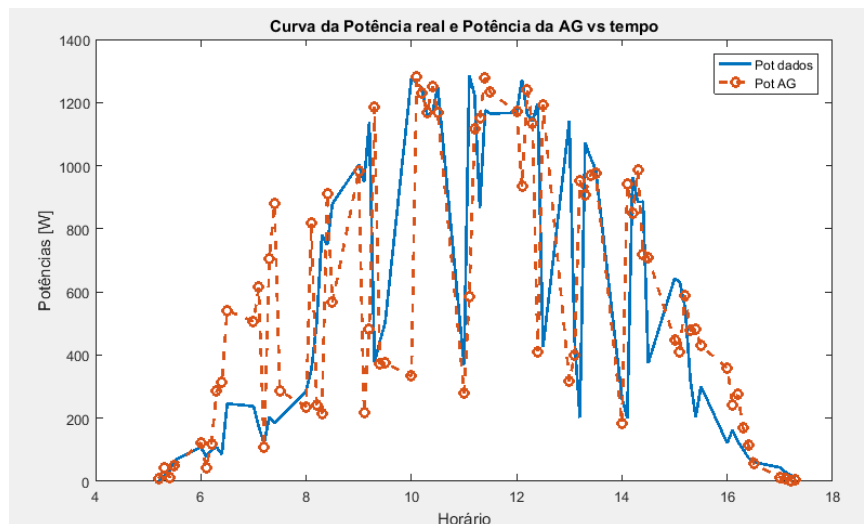


Figura 06 – Curva da potência da GD FV e potência calculada pelo AG no dia 01/12/2017.

É mostrado na Figura 07 as curvas da potência média, irradiação e temperatura ambiente para os dados medidos e estimados pelo AG.

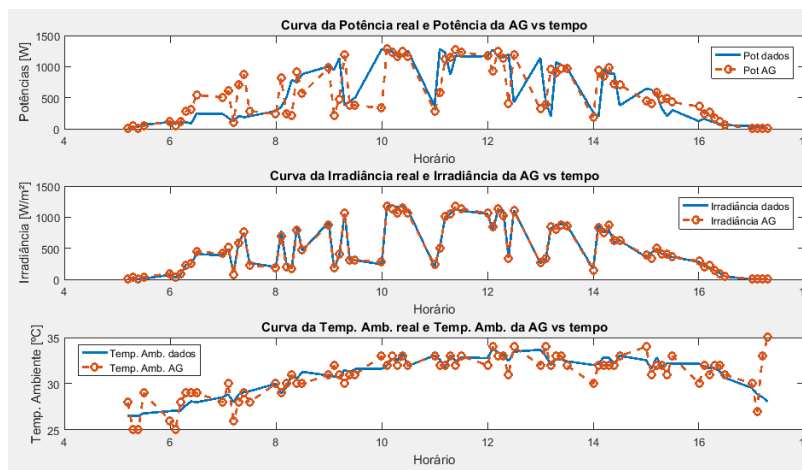


Figura 07 – Curvas com dados medidos e curvas com dados obtidos pelo AG do dia 01/12/2017.

Na Tabela 1 é mostrado o resumo dos dados obtidos através dos sistemas medições e também são mostrados os resultados dos valores calculados com o AG para o dia 01/12/2017.

Tabela 1 – Valores reais e calculados com a AG do dia 01/12/2017.

Dados medidos		Dados obtidos com a AG		Erro (%)
Irradiação média real	6,23 kWh/m ²	Irradiação AG média	6,21 kWh/m ²	0,32%
Temp. Ambiente média real	30,95 °C	Temp. Ambiente AG média	30,92 °C	0,10%
Potência média real	562,16 W	Potencia AG média	572,84 W	-1,90%
Geração da GD FV	6,93 kWh	Geração estimada pela AG	7,07 kWh	-1,90%

3.2. Dia com condições desfavoráveis à geração de eletricidade através da GD FV

O dia analisado para as condições desfavoráveis de geração de eletricidade com a GD FV foi o dia 17/11/2017, neste dia a GD FV teve potência média de 432,59 W, irradiação média diária de 3,99 kWh/m² e temperatura ambiente média de 29,17 °C, sendo estas medições feitas no mesmo período que foi feita as medições para o dia com condições favoráveis, a fim de se ter uma comparação fidedigna, tendo o sistema FV gerado eletricidade em torno de 5,34 kWh.

São mostradas, na Figura 08, as curvas da potência instantânea da GD FV e a curva de irradiação solar no dia 17/11/2017. No período matutino houve pouca irradiação global devido à precipitação chuvosa que ocorreu neste período, assim, a GD FV alcançou potências relativamente baixas quando comprado com o caso com condições favoráveis, logo, ocorre uma baixa geração de eletricidade neste período.

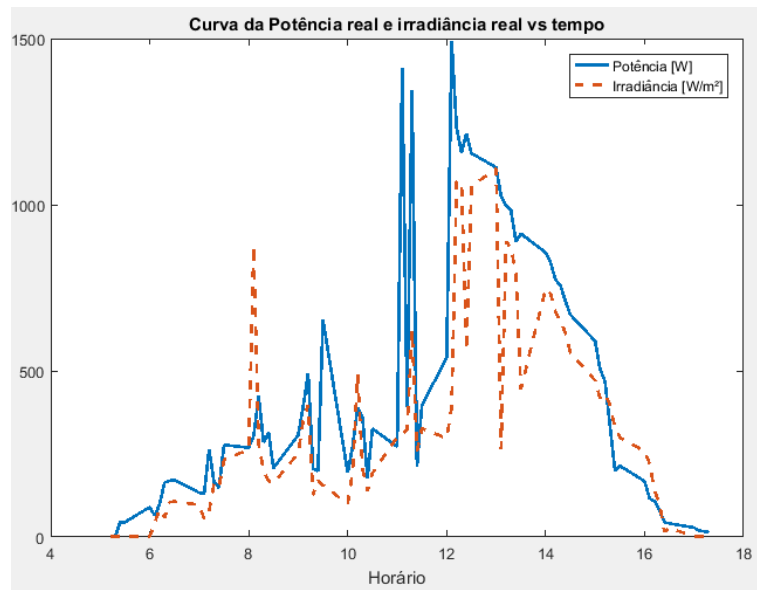


Figura 08 – Curva da potência instantânea da GD FV e da Irradiância solar do dia 17/11/2017.

As curvas da irradiância medida e da irradiância calculada pelo AG do dia 17/11/2017, Figura 09, foram similares, tendo-se neste dia uma irradiação média diária de 3,99 kWh/m² e 4,00 kWh/m², respectivamente, estes valores sendo distintos, segundo a Equação (2), em apenas -0,18%.

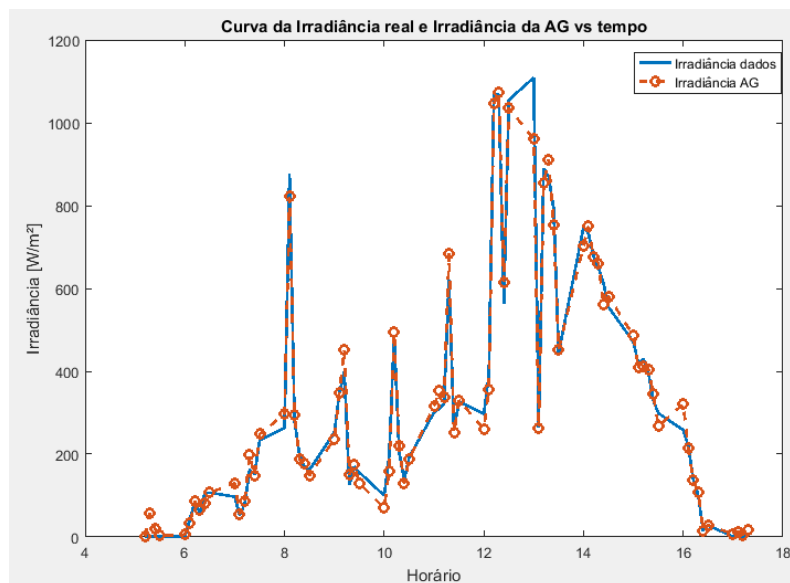


Figura 09 – Curva da Irradiância solar e da Irradiância do AG do dia 17/11/2017.

A temperatura ambiente do dia 17/11/2017 teve um valor similar a temperatura ambiente calculada pelo AG, sendo estes valores de 29,17 °C e 29,42 °C, respectivamente, diferindo, segundo a Equação (3), apenas -0,86%. A estimativa da temperatura média para as condições desfavoráveis é exata, mas os valores pontuais são de difícil convergência, sendo, portanto, menos precisos, Figura 10, principalmente quando a temperatura ambiente está próxima dos seus valores mínimos, ou seja, baixa

irradiação global. Quando a temperatura ambiente possui valores mais elevados, devido a uma irradiação global mais elevada, os valores desta temperatura tendem a ser exatos e precisos.

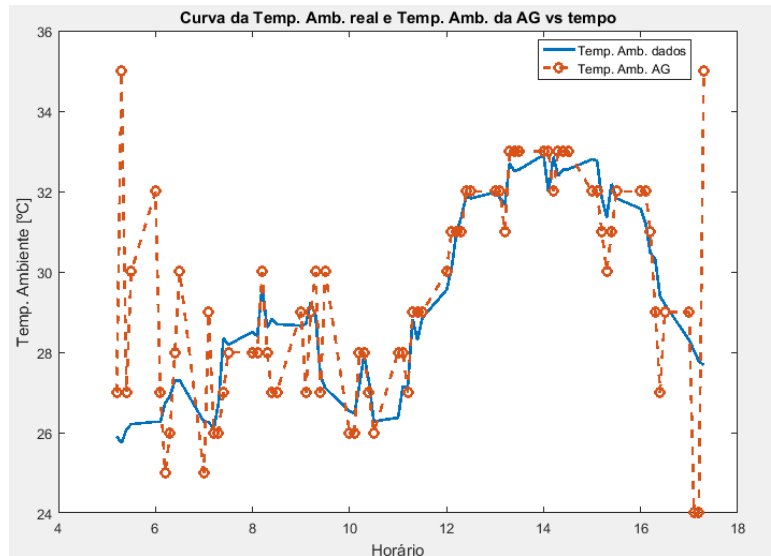


Figura 10 – Temperatura ambiente próxima à GD FV e temperatura ambiente do AG no dia 17/11/2017.

A potência média da GD FV no dia 17/11/2017 foi de 432,59 W, sendo estimado pelo AG um valor de potência média de 381,29 W, tendo uma diferença, conforme a Equação (5), de 11,86% do valor real, o comportamento das destas potências durante este dia é mostrado na Figura 11. A estimativa da potência FV, através do AG, para as condições desfavoráveis à GD FV é menos exata que a estimativa para as condições favoráveis. A geração de eletricidade da GD FV neste dia foi de 5,34 kWh, tendo o AG previsto uma geração de eletricidade de 4,70 kWh.

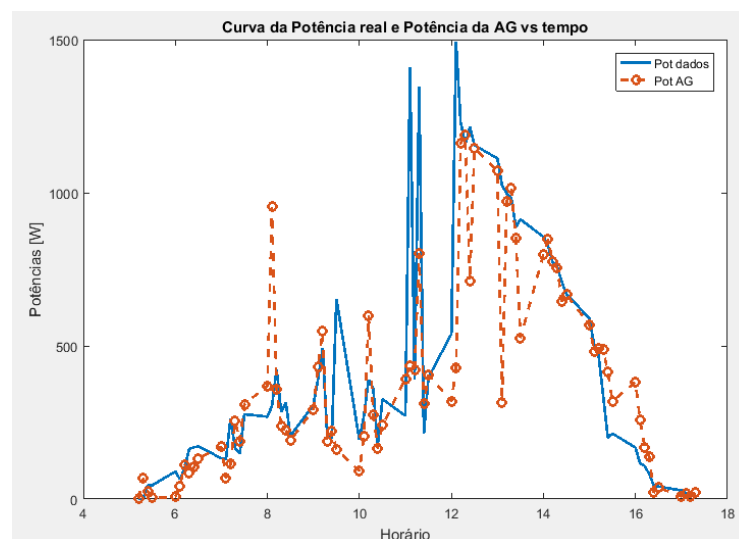


Figura 11 – Curva da potência da GD FV e potência calculada pelo AG no dia 17/11/2017.

É mostrado na Figura 11 as curvas da potência média, irradiação e temperatura ambiente para os dados medidos e estimados pelo AG.

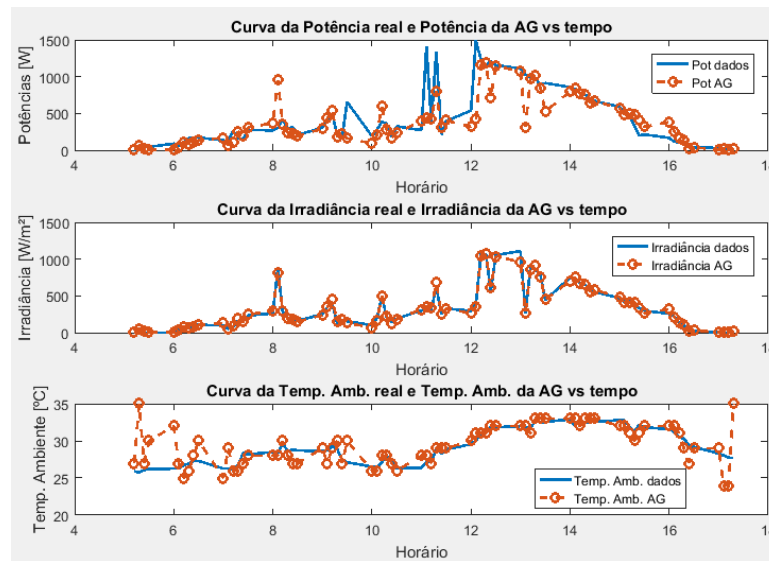


Figura 07 – Curvas com dados medidos e curvas com dados obtidos pelo AG do dia 17/11/2017.

Na Tabela 2 é mostrado o resumo dos dados obtidos através dos sistemas medições para o dia com condições desfavoráveis à geração de eletricidade. 17/11/2017, e também são mostrados os resultados dos valores calculados com o AG.

Tabela 1 – Valores reais e calculados com a AG do dia 01/12/2017.

Dados medidos			Dados obtidos com a AG			Erro (%)
Irradiação média real	3,99	kWh/m ²	Irradiação AG média	4,00	kWh/m ²	-0,18%
Temp. Ambiente média real	29,17	°C	Temp. Ambiente AG média	29,42	°C	-0,86%
Potência média real	432,59	W	Potência AG média	381,29	W	11,86%
Geração da GD FV	5,34	kWh	Geração estimada pela AG	4,70	kWh	11,86%

4. Conclusão

O presente artigo mostrou um método de estimativa do potencial de uma GD FV através do uso de um AG para uma planta instalada em Fortaleza, Ceará. O modelo proposto por Dias et al., que considera as características locais de temperatura ambiente e irradiação global para a geração de eletricidade foi essencial como parte integrante da função objetivo.

Os erros médios percentuais dos valores medidos e calculados pelo AG para o dia com condições favoráveis, 01/12/2017 à geração de eletricidade através da GD FV foram pequenos, sendo de 0,33% para a irradiação, 0,10% para a temperatura ambiente e de -1,90% para a potência média diária da GD FV.

O dia com condições desfavoráveis, 17/11/2017, à geração de eletricidade através da GD FV apresentou erros médios percentuais dos valores medidos e calculados pelo AG pequenos em relação a irradiação e temperatura ambiente, sendo

estes erros de -0,18% e -0,86%, respectivamente. O erro em relação à potência média para o dia com condições desfavoráveis à geração de eletricidade foi maior que o erro para o caso com condições favoráveis, sendo este erro de 11,86%, que ainda pode ser considerado uma boa estimativa, devido as dificuldades atuais dos métodos de estimativa do potencial FV.

Este trabalho mostrou que o potencial FV de uma região pode ser estimado com exatidão pelo AG, desde que se tenham medições adequadas de irradiação global e temperatura ambiente.

Referências

DIAS, C. L. A.; BRANCO, D. A. C.; AROUCA, M. C.; & LEGEY, L. F. L. *Performance estimation of photovoltaic Technologies in Brazil*. Renewable Energy Vol. 114, Part B, p. 367-375, 2017.

ANEEL. *Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012*. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2012.

ANEEL. *Resolução Normativa Nº 687, de 24 de Novembro de 2015*. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2015.

EPE. *Balanco energético Nacional 2017 com no ano base 2016: Resultado final*. Empresa de Pesquisa Energética. 2017.

VIEIRA, O. L.; SILVA, F. J. R.; MACHADO, L. A.; CORREIA, A. N. F.; VITORIANO, C. T.; OLIVEIRA, A. H.; FRANKLIN, R. P. D.; MENEZES, J. C. F.; APOLINÁRIO, M. F.; NASCIMENTO, J. W. F. & CARVALHO, P. C. M. *Comparison of Photovoltaic Plant Performance Estimation Models: A Case Study for Fortaleza, Brazil*. IEEE Latin America Transactions Vol. 16, n. 7, p. 1898-1906, July 2018.

MADI, S. & KHELDOUN, A. *Comparative Energy Analisis of Photovoltaic Module*. 8th International Conference on Environment Science and Engineering. ICESE 2018.

SOARES, F. S.; COSTA, D. A. C.; BEZERRA, J. R.; BARROSO, G. C.; LEÃO, R. P. S.; CARVALHO, P. C. M. *Alocação Ótima de Geração Distribuída para a Rede de Distribuição da UFC-Campus do Pici*. In: XII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2017, Curitiba. XII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica, 2017.

LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional*. 2^o Edição. BRASPORT. 2008.