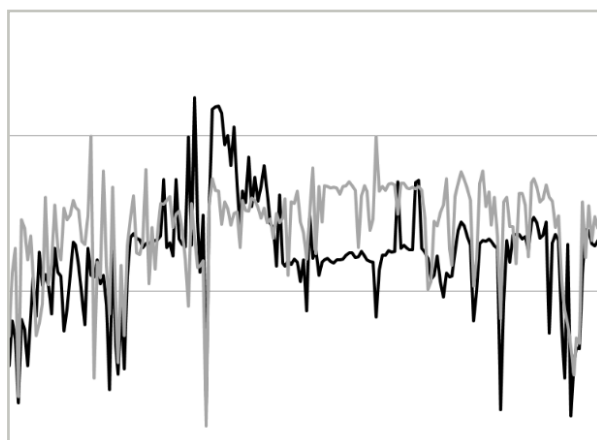


# INFORME GOIANO

## CIRCULAR DE PESQUISA APLICADA

### ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DE PÁNEIS FOTOVOLTAÍCOS PARA MAIOR GERAÇÃO DE ENERGIA EM IPORÁ-GO



#### Expediente:

Aurélio Rúbio Neto  
Editor-chefe  
Jackson Zuchi  
Editor-chefe substituto  
Tatianne Silva Santos  
Supervisora editorial  
Maria Luiza Batista Bretas  
Revisora gramatical  
Guilherme Cardoso Furtado  
Diagramador  
Cláudia Sousa Oriente de Faria  
Coordenadora de produção gráfica

#### Autores:

Lorena Martins Oliveira  
Instituto Federal Goiano, Campus Iporá  
Vanessa de Fátima Grah Ponciano  
Instituto Federal Goiano, Campus Iporá  
Makcy Ramon Kened Souza Silva  
Instituto Federal Goiano, Campus Iporá  
Isaac de Matos Ponciano  
Faculdade de Iporá

#### Importância e relevância

Um requisito para a vida moderna e para erradicação da pobreza em todo o planeta é o acesso à energia. Mesmo com aumento de demanda de energia elétrica residencial, ainda existem muitas pessoas sem acesso a serviços modernos de energia, sendo esta também uma razão para estudo e investimento em fontes alternativas desse recurso (FRANCISCO et al., 2019).

Em janeiro de 2020, a capacidade total de geração de energia elétrica no Brasil atingiu aproximadamente 170 GW com participação das diversas fontes energéticas. Enquanto as termoeletricas (24,2%) e as hidroelétricas (64,13%) são consideradas fontes firmes para a demanda de carga típica do sistema, fontes renováveis como a eólica (9,04%) e a solar fotovoltaica (1,45%) são consideradas fontes intermitentes de energia, por conta da variabilidade temporal associada às condições meteorológicas presentes no local

da planta ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020). Nesse contexto, pode-se considerar a matriz energética brasileira, um sistema essencialmente hidrotérmico de grande porte, com grande domínio de usinas hidroelétricas e com múltiplos proprietários.

A energia solar fotovoltaica gerada em 2017 tinha participação na matriz energética de apenas 0,02% (ANEEL, 2017). O aumento exponencial visto em 2020 dos investimentos nesse tipo de energia no Brasil e no mundo, deve-se a maior consciência ambiental da população em relação ao aquecimento global e a redução dos custos dos equipamentos dos sistemas de geração fotovoltaica (FV), quando comparados com a produção de energia oriunda das usinas térmicas (AZOFRA, 2015).

De acordo com a ANEEL (2020) durante os próximos anos poderá ser observado no Brasil o aumento da participação da energia FV na matriz energética, visto que,

# ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAÍCOS PARA MAIOR GERAÇÃO DE ENERGIA EM IPORÁ-GO

das unidades geradoras de energia em construção, tem-se 8,73% voltadas para centrais FV e dos empreendimentos com a construção ainda não iniciada, 38,11% serão centrais FV.

Esses fatores ligados ao alto custo da energia elétrica, a escassez de recursos não renováveis e, com as novas regulamentações que possibilitaram a compensação entre energia gerada e a consumida, têm contribuído para o aumento deste tipo de geração distribuída, principalmente, nas áreas residenciais.

A fim de incentivar a expansão da geração distribuída e com vistas a atender ao Plano Nacional de Energia, em abril de 2012 a ANEEL regulamentou a conexão de micro e mini geradores a partir de fontes renováveis nas redes de distribuição, em especial a solar FV, por meio da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 (RN482). Essa legislação prevê o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que se tenha o balanço entre a energia consumida e a gerada pela unidade consumidora (modelo “*net metering*”). Nesse modelo, a energia gerada pelo sistema FV, por exemplo, quando exceder a necessidade de consumo da unidade consumidora, o excesso será compensado nas próximas faturas de energia. É uma forma de contribuir e incentivar o uso da geração distribuída por consumidores residenciais (ANEEL, 2012).

Para a instalação adequada dos painéis FV, a qual aproveita melhor a radiação solar incidente, a posição ideal para os painéis fotovoltaicos implantados em telhados de casas ou centros comerciais no hemisfério sul, é voltada para o Norte geográfico. Visto que o Sol nasce no Leste e em sua trajetória inclina-se em direção ao norte até se pôr no Oeste (DANTAS NETO, 2018).

No entanto, o que se observa é que raramente tem-se essa condição favorável para a instalação dos arranjos fotovol-

taicos. Via de regra os micros e minis sistemas FV conectados à rede elétrica são instalados em telhados cuja orientação e inclinação não atendem a situação ideal, resultando numa geração de energia abaixo do potencial de pico do painel. Nos últimos anos, tem-se observado um aumento da instalação de geradores fotovoltaicos na cidade de Iporá, fato que motivou a realização desse trabalho com o objetivo de buscar dados de índice de claridade ( $K_t$ ) e Irradiância total incidente na superfície inclinada ( $I_{TA}$ ) do período da manhã e tarde. Assim como o tempo de retorno do investimento e a melhor orientação no sentido Leste ou Oeste dos painéis solares quando não há possibilidade de instalação para o Norte como é o recomendado.

## Determinação do melhor posicionamento dos painéis solares

O município de Iporá – GO está localizado no Sudoeste Goiano, onde o Domínio Cerrado é o bioma de característica predominante. Uma região onde clima é tipicamente tropical semiúmido possuindo duas estações sazonais bem delimitadas (SPECIAN & VECCHIA, 2014). Os dados de irradiação solar total na horizontal ( $I_{TH}$ ), para o ano 2018, são obtidos a partir da estação meteorológica automática do INMET instalada na Fazenda Escola do IF Goiano Campus Iporá (a 16° 25' 23" S, 51° 08' 55" W, e com altitude de 610 m). A estação disponibiliza os dados horários de Irradiação solar total na horizontal. A partir desses dados calculam-se o coeficiente de claridade ( $K_t$ ) e a irradiância total incidente na superfície inclinada ( $I_{TA}$ ).

O  $K_t$  é resultante da irradiação solar total na horizontal ( $MJ\ m^{-2}$ ) dividida pela irradiação solar extraterrestre ( $MJ\ m^{-2}$ ), as quais são calculadas pelas eq. (1) e eq. (2), de acordo com Iqbal (1983) e Duffie & Beckman (1980), respectivamente.

(1)

$$I_0 = I_{sc} \left[ 1 + 0,034 \times \cos \left( \frac{360 \times DJ}{365,25} \right) \right] [\sin \delta \times \sin \phi + \cos \delta \times \cos \phi \times \cos \omega]$$

(2)

$$K_t = \left( \frac{I_{TH}}{I_0} \right)$$

# ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DE PÁNEIS FOTOVOLTAÍCOS PARA MAIOR GERAÇÃO DE ENERGIA EM IPORÁ-GO

$I_0$  = irradiação solar extraterrestre na horizontal ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$I_{sc}$  = constante solar ( $1353 \text{ W m}^{-2}$ ), segundo a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos (NASA)

$I_{TH}$  = Irradiação solar total na horizontal ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

DJ = Dia juliano (-)

$\delta$  = declinação solar (graus)

$\phi$  = latitude do local (graus)

$\omega$  = ângulo horário (graus)

Enquanto isso a  $I_{TA}$  é calculada a partir da eq. (3), apresentada por Stine e Geyer (2001), em Grah (2015), de acordo com o método desenvolvido por Liu e Jordan (1963).

(3)

$$I_{TA} = I_{BA} + \left[ I_{DH} + \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) + \sigma I_{TH} + \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right]$$

$I_{TA}$  = Irradiância total incidente na superfície inclinada ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$I_{BA}$  = Irradiância direta incidente na superfície inclinada ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$I_{DH}$  = Irradiância difusa incidente na superfície horizontal ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$I_{TH}$  = Irradiância total incidente na superfície horizontal ( $\text{MJ m}^{-2}$ )

$\sigma$  = Albedo

Para avaliar o melhor posicionamento dos geradores FV, é necessário calcular duas vezes por dia as variáveis Kt e  $I_{TA}$ : i) primeiro referente ao nascer do sol até 11h59, sentido leste; ii) segundo referente as 12h até o pôr do sol, sentido oeste. A partir dos dados obtidos é necessária a construção de gráficos para se observar o comportamento dos componentes avaliados.

## Análise do tempo de retorno do investimento

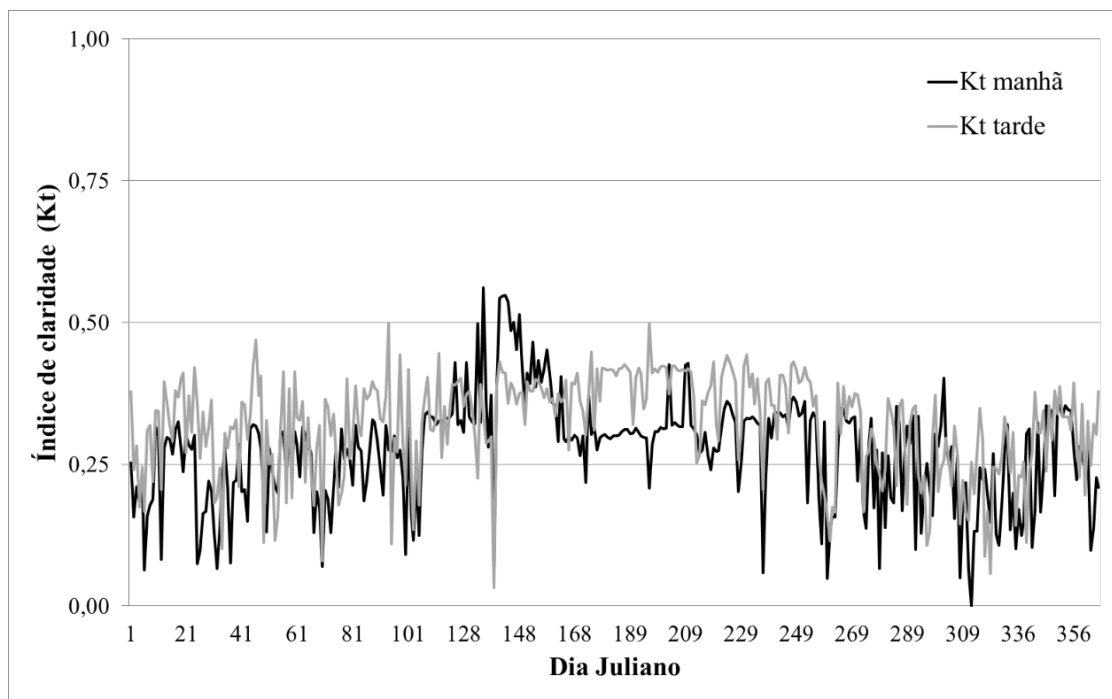
Para avaliar o tempo necessário para que um sistema FV gere energia suficiente para pagar o investimento inicial, três cenários são analisados: residência com baixo nível de consumo (2 kWp) com custo de instalação de R\$ 14.080,00; residência com médio nível de consumo (4 kWp) com custo de instalação de R\$ 23.040,00; resi-

dência com grande nível de consumo (8 kWp) com custo de instalação de R\$ 41.200,00 (BLUESOL, 2020). Assim, calcula-se o quanto de energia é produzida anualmente, em que o somatório da energia gerada ao longo do ano ( $\text{kWh m}^2$ ) é multiplicado pela área de um painel FV de 200 Wp ( $1,29 \text{ m}^2$ ) e pela eficiência do painel FV (15%). A tarifa de energia elétrica utilizada é igual a 0,5337 R\$  $\text{kWh}^{-1}$  (tarifa residencial urbana) e 0,4056 R\$  $\text{kWh}^{-1}$  (tarifa residencial rural) para o estado de Goiás no ano de 2020 (ENEL, 2020), como referência para os cálculos. Depois, realiza-se uma projeção do valor anual do kWh gerado, considerando a taxa de inflação anual de 4,31%, dados do IPC de 2019 (IBGE, 2020); no horizonte de 25 anos (vida útil do gerador FV). Dessa maneira, calcula-se em quanto tempo paga-se o investimento inicial e quanto é gerado em energia elétrica FV no final de 25 anos.

## Escolha do melhor posicionamento

A partir da avaliação dos dados de coeficiente de claridade (Kt) para o local de estudo, Fig. 1, em que do Kt para o sentido Oeste (tarde) foi 24,09% superior quando comparado ao Kt médio para orientação Leste (manhã), o que pode refletir em maior produção de energia superior, visto que o Kt com valores próximos a 1,0 representa dias de céu mais claro e Kt com valores próximos a zero representa dias com céu mais nebuloso. Desse modo, para a Cidade de Iporá, no período da manhã há maior nebulosidade e por isso a geração de energia FV nesse período fica mais comprometida, quando comparada com o período da tarde (Figura 1).

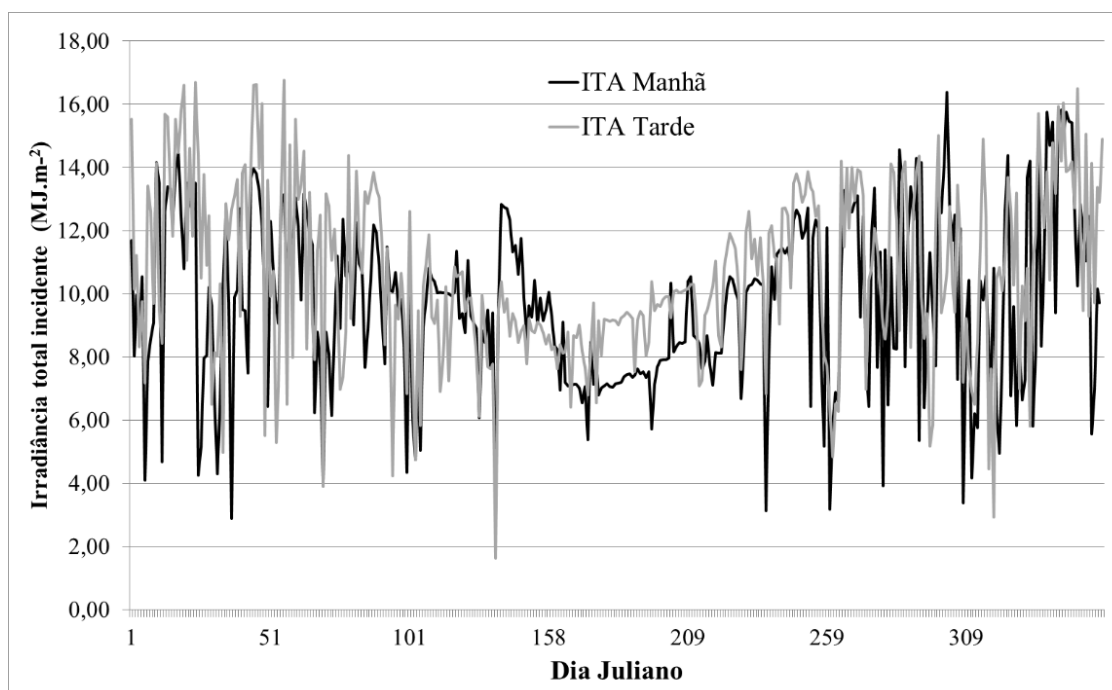
## ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DE PÁNEIS FOTOVOLTAÍCOS PARA MAIOR GERAÇÃO DE ENERGIA EM IPORÁ-GO



**Figura 1.** Índice de claridade para cidade de Iporá-GO, em 2018. Fonte: Os autores.

A confirmação do maior potencial de geração de energia durante a tarde é obtida a partir da avaliação da irradiância total incidente na superfície inclinada ( $I_{TA}$ ) como disposta na Figura 2. Nessa observa-se que o melhor posicionamento dos painéis na Cidade de Iporá é realmente para o Oeste

(tarde). Pois a  $I_{TA}$  pela tarde (Oeste) apresenta-se maior quando comparada  $I_{TA}$  calculada para o período vespertino. A  $I_{TA}$  vespertina teve uma média diária de  $10,20 \text{ MJ m}^{-2}$ , e a matutina foi de  $9,69 \text{ MJ m}^{-2}$ , tendo assim, 5,29% maior incidência de raios solares.



**Figura 2.** Irradiância total incidente na superfície inclinada de Iporá-GO, em 2018. Fonte: Os autores.

# ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAÍCOS PARA MAIOR GERAÇÃO DE ENERGIA EM IPORÁ-GO

A radiação solar é uma das variáveis meteorológicas mais afetadas pela presença de nuvens sobre o céu (TERAMOTO; ESCOBEDO, 2012). Por isso, o conhecimento sobre o coeficiente de claridade é de fundamental importância para a elaboração de projetos de pesquisa voltados para a conversão da energia fotovoltaica, nas áreas das: engenharias; climatologia; arquitetura; agronomia; entre outras (MARTINS et al., 2012). Sendo o nível de irradiação solar o principal parâmetro que influencia a produção de energia, seguido da temperatura e limpeza dos painéis, perdas ao longo do processo de transmissão de energia e a degradação ao longo do tempo (GALDINO; PINHO, 2014).

Os resultados obtidos nesse trabalho, diferem dos dados observados por Monteiro Jr. et. al (2016), que avaliaram o impacto da inclinação e da orientação do painel FV na produção de energia na cidade de Palmas-TO, região norte do Brasil na latitude 10,19° Sul e longitude 48,30° Oeste. Os autores demonstraram que a diferença na produção de energia entre a orientação leste e oeste não chega a ser relevante, sendo que na orientação leste a produção anual foi 1,2% superior quando comparada com a orientação oeste.

Gasparin e Krenzing (2017) ao avaliar o desempenho de um sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras (em diferentes latitudes) com diferentes orientações do painel, verificaram que há uma faixa relativamente ampla de inclinações e orientações quando avaliadas diferentes regiões do país. Sendo que para as cidades Santa Maria - RS e Curitiba - PR a simulação resultou em uma produção 1% maior

na orientação oeste quando comparada com a orientação leste. Diferentemente do que ocorre para as cidades de São Paulo - SP, Belo Horizonte-MG, Bom Jesus da Lapa-BA, Campo Grande-MS e Brasília-DF, onde a maior geração de energia ocorre na orientação leste em relação ao oeste.

As diferenças obtidas nos trabalhos corroboram a importância de se avaliar cada cidade separadamente, pois cada local apresenta suas peculiaridades quanto ao clima, padrão de nebulosidade e atenuação dos raios solares devido à presença de poluição e alta concentração de poeira no ar.

Observa-se na tabela 1 o tempo de retorno do investimento. Em média, com o painel orientado para o oeste, o tempo de retorno fica dois 2 anos mais rápido tanto para a tarifa residencial urbana quanto rural, gerando um tempo de retorno próximo ao orientado para o norte (recomendado) de 5,79 anos (CAMARGO, 2017). Observa-se ainda que o tempo de retorno é menor em residências urbanas devido ao valor do kWh ser maior em comparação com residências rurais. Mendes (2018) em um estudo da viabilidade de sistemas FV para a irrigação com pivô central, demonstrou que residências urbanas apresentam maior economia diária, e consequentemente, retorno mais rápido do investimento inicial, visto que quanto maior o valor da tarifa, menor o tempo de retorno. Oliveira (2018) por meio de projeções dos preços das tarifas energéticas ao longo da vida útil dos módulos obteve tempo de retorno de 5 anos.

Residência	Pequeno		Médio		Grande	
	Leste	Oeste	Leste	Oeste	Leste	Oeste
Urbana	8 a 9	6 a 7	6 a 7	5 a 6	6 a 7	4 a 5
Rural	10 a 11	8 a 9	8 a 9	6 a 7	7 a 8	6 a 7

**Tabela 1.** . Tempo de retorno (anos) para pagamento do investimento inicial para três cenários de consumo de energia elétrica: baixo, médio e grande, com valores diferentes de investimento inicial; para dois tipos de tarifas energéticas: residencial urbana e residencial rural; e para duas orientações dos geradores FV: leste e oeste. Fonte: Os autores.

## ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAÍCOS PARA MAIOR GERAÇÃO DE ENERGIA EM IPORÁ-GO

A tabela 2 demonstra o valor economizado com a conta de energia em um período de 25 anos, para uma residência rural e urbana. Melo (2020) realizou projeções com o reajuste anual, já com impostos da taxa de inflação uti-

lizando 5,85% a.a., e obteve no 25º ano um reembolso 3 vezes maior que o inicial, devido ao aumento da tarifa energética.

Residência	Nível de consumo		
	Pequeno	Médio	Grande
Urbana	R\$ 83.841,87	R\$ 167.683,74	R\$ 335.367,48
Rural	R\$ 63.717,94	R\$ 127.435,87	R\$ 254.871,74

**Tabela 2.** . Montante gerado em energia elétrica (em reais, R\$) ao longo da vida útil de 25 anos, para três cenários de consumo de energia elétrica: baixo, médio e grande, com valores diferentes de investimento inicial; para dois tipos de tarifas energéticas: residencial urbana e residencial rural; e para a orientação oeste dos geradores FV. Fonte: Os autores.

### Recomendações finais

O melhor posicionamento dos painéis solares na cidade de Iporá é para o sentido Oeste, uma vez que a média da irradiância total incidente na superfície inclinada é maior no período da tarde em relação ao período da manhã. O que demonstra que os painéis orientados para o sentido Oeste têm maior geração de energia FV, quando levado em consideração irradiância total incidente na superfície inclinada e o índice de claridade. Além disso, com os painéis orientado à oeste é possível obter um menor tempo de retorno sobre o valor investido.

Vale ressaltar que além dos parâmetros avaliados, outros fatores podem impactar na eficiência e produção da geração de energia fotovoltaica, como: latitude, inclinação, posição em relação ao norte, temperatura, limpeza dos painéis, entre outros. Tais fatores podem fazer com que dois sistemas FV voltados para a mesma orientação tenham resultados distintos, o que deve ser levado em consideração ao se comparar a geração de energia solar FV.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano Campus Iporá e ao Grupo de Pesquisa em Água e Energias Renováveis do IF Goiano Campus Iporá, pelo apoio na realização deste trabalho.



# ESTUDO DO DIRECIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAÍCOS PARA MAIOR GERAÇÃO DE ENERGIA EM IPORÁ-GO

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL [Agência Nacional de Energia Elétrica]. Banco de Informações de Geração (BIG). Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 16 de jan. 2020.

CAMARGO, L. T. **Projeto de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica**. Londrina-PR. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em engenharia elétrica). Universidade Estadual de Londrina.

DANTAS NETO, P.M., 2018. **Aumento da eficiência na captação de raios solares na produção de energia elétrica em células fotovoltaicas, por meio de um seguidor solar**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em ciência da tecnologia), Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

FRANCISCO, A. C. C.; VIEIRA, H. E. M.; ROMANO, R. R.; ROVEDA, S. R. M. M. Influência de parâmetros meteorológicos na geração de energia em painéis fotovoltaicos: um caso de estudo do smart campus Facens, SP, Brasil. **Urbe**. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, n.1, 2019. p. 1-15.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley, 1980. 705 p.

GALDINO, M. C.; PINHO, J.T. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), CEPEL: CRESEB, 2014, 530 p.

GASPARIN, F. P.; KRENZINGER, A. Desempenho de um sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras com diferentes orientações do painel. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.8, n. 1, 2017. p.10-17.

GOSTEIN, M. J. R.; CARON, B. L., Análise De Desempenho De Sistemas Fotovoltaicos Com Diferentes Ângulos De Inclinação E Azimute Localizados Em Palmas-To. In: **Photovoltaic Specialist Conference**, n. 40. Resumos. Uberlândia, MG: UFU, 2014.

GRAH, V.F., 2015. **Avaliação do posicionamento de geradores fotovoltaicos com sistema rastreador manual**

**aplicado ao bombeamento de água para irrigação**. Piracicaba- SP. 2014. Tese (Título de Doutora em Engenharia de Sistemas Agrícolas). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**, New York, Academic Press, 1983, 390 p.

MARTINS, D.; ESCOBEDO, J.F.; DAL PAI, E.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J. Análise sazonal das frações solares  $K_t$ ,  $K_{Dh}$  e  $K_d$  da radiação global em Botucatu/ Brasil. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar e Conferência Latino-Americana da ISES**, n. 4, 2012, São Paulo. Resumos. São Paulo: USP, INCT-EEREA, 2012.

MELO, F. C. **Análise de viabilidade técnica e econômica de um projeto fotovoltaico: Estudo de caso: Estádio Aderbal Ramos da Silva**. Florianópolis, 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em engenharia elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

MENDES, A, P. **Viabilidade de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica para irrigação com pivô central**. Uberlândia, MG. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em engenharia ambiental). Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias.

MONTEIRO JÚNIOR, A., SANTANA, K. G. S., MACEDO, A. C., NASCIMENTO, O. C. S., SILVA, S. B. Análise de desempenho de sistemas fotovoltaicos com diferentes ângulos de inclinação e azimute localizados em Palmas-TO. In: **Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica**, n. 14, 2016, Uberlândia, MG: UFU, 2016.

OLIVEIRA, L, H. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede de energia elétrica**. Uberlândia, MG. 2018. Monografia (Bacharel em engenharia elétrica). Universidade Federal de Uberlândia.

SPECIAN, V.; VECCHIA, F. A. S.; Distribuição da frequência mensal da precipitação para região Oeste de Goiás: comparação entre dois postos pluviométricos. **Ateliê Geográfico**, v. 8, n. 1, 2014. p. 200-214.

TERAMOTO, E.T.; ESCOBEDO, J.F. Análise da frequência anual das condições de céu em Botucatu, São Paulo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n. 9, 2012. p. 985-992.

