

LEANDRO GONÇALVES DE BEM

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DE
ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Delly Oliveira Filho

Coorientadores: Hewley Maria Acioli Imbuzeiro
João Victor Pereira Oliveira
Sérgio Yoshimitsu Motoike

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B455m Bem, Leandro Gonçalves de, 1994-
2021 Modelagem, simulação e desenvolvimento de protótipos de
árvore solar fotovoltaica / Leandro Gonçalves de Bem. – Viçosa,
MG, 2021.

1 dissertação eletrônica (169 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Delly Oliveira Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2021.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.039>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Geração de energia
fotovoltaica. 3. Geração de energia elétrica. I. Filho, Delly
Oliveira. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 621.47

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fátima Alves CRB6/2578

LEANDRO GONÇALVES DE BEM

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DE
ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 12 de novembro de 2021.

Assentimento:



Leandro Gonçalves de Bem
Autor



Dely Oliveira Filho
Orientador

À minha família e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a minha caminhada durante este mestrado.

Em especial a Deus, pela vida, por sempre iluminar meu caminho, me guiar, dar forças e permitir que cada passo fosse dado para a conclusão deste ciclo.

Aos meus pais, Maria do Carmo e Antonio, por todo empenho, amor e por me incentivarem nos desafios mais difíceis.

Às minhas irmãs, Lidiane e Livia, essenciais na minha vida, sempre me apoiando e me ajudando a evoluir. Aos meus cunhados, Maykon e Guilherme, por toda parceria. Ao meu sobrinho, Heitor, fonte de esperança.

Ao meu orientador, professor Delly Oliveira Filho, por toda paciência, dedicação e conhecimento transmitido.

Aos meus coorientadores, professora Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro, professor João Victor Pereira Oliveira e professor Sérgio Yoshimitsu Motoike, por todos os conselhos e auxílios durante a realização desta pesquisa.

Aos estagiários de ensino, Vinícius Maciel da Costa e David Lelis Filho, por apostarem no meu projeto e se dedicarem ao mesmo.

Aos amigos, por estarem sempre presentes durante essa trajetória e por me ajudarem a fazer desse período uma caminhada mais leve.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de fazer o curso e realizar essa capacitação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

BEM, Leandro Gonçalves de, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2021. **Modelagem, simulação e desenvolvimento de protótipos de árvore solar fotovoltaica**. Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro, João Victor Pereira Oliveira e Sérgio Yoshimitsu Motoike.

A energia solar fotovoltaica vem se destacando no contexto atual de geração de energia elétrica. Isso tem ocorrido, principalmente, em razão da crescente demanda da sociedade por energia, da busca pela diminuição dos impactos ambientais e da redução dos custos diretos e indiretos associados a essa tecnologia. Entretanto, para se instalar um sistema fotovoltaico plano e fixo, necessita-se de uma área livre de sombreamento. Esta, por sua vez, vem se tornando cada vez mais escassa, especialmente no meio urbano. Assim, introduz-se o conceito de árvore solar fotovoltaica, no qual geradores fotovoltaicos, em analogia às folhas de uma árvore, são posicionados em uma estrutura vertical similar à um tronco. Essa proposta de sistema fotovoltaico no formato de uma árvore busca a geração de energia elétrica em uma área ocupada reduzida, além de poder apresentar uma estética mais agradável e possibilitar um uso múltiplo do local. Desta forma, esta pesquisa buscou ampliar as discussões acerca desse tipo de sistema, apresentando uma revisão sobre árvore solar fotovoltaica com foco em modelagem, simulação, topologia, orientação dos geradores fotovoltaicos, características construtivas, rastreamento solar, área ocupada e uso múltiplo. As modelagens e simulações foram realizadas, considerando o sombreamento gerado entre células fotovoltaicas, para dois modelos de árvores, espiralada e conífera, de modo a determinar a radiação solar incidente nas células fotovoltaicas e, conseqüentemente, a melhor orientação para cada uma. Dentre os melhores resultados das simulações de árvore solar se destaca o modelo espiralado de 61 células que mostrou ser até 293,55% mais eficiente em termos de radiação solar incidente por unidade de área, do que o sistema plano e fixo de mesma área ocupada. Em seguida, foram projetados e construídos protótipos de árvores solares fotovoltaicas com o intuito de validar as simulações. Concluiu-se que o modelo de árvore solar espiralada tende a ser melhor quando o objetivo é maximizar o ganho de energia por área, enquanto a conífera se destacou por apresentar menores perdas de radiação solar por sombreamento, quando comparada com as árvores de modelo espiralada. Porém, ao comparar os protótipos de árvores solares com o de um sistema

fotovoltaico plano e fixo, foi verificado que este último foi o mais eficiente na geração de energia elétrica estimada por célula fotovoltaica. Os resultados experimentais corroboraram os simulados na sua tendência em apontar quais foram os protótipos mais eficientes, mas não em termos de valores numéricos. Frisando-se que os resultados experimentais se referem a cálculos de estimativas feitas da geração de energia elétrica, a partir de valores medidos, e os valores simulados foram feitos para radiação solar anual incidente nos geradores das árvores.

Palavras-chave: Energia renovável. Orientação de geradores fotovoltaicos. Uso múltiplo de sistemas fotovoltaicos. Geração de energia elétrica.

ABSTRACT

BEM, Leandro Gonçalves de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2021. **Modeling, simulation and development of photovoltaic solar tree prototypes.** Adviser: Delly Oliveira Filho. Co-advisers: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro, João Victor Pereira Oliveira and Sérgio Yoshimitsu Motoike.

Photovoltaic solar energy has been standing out in the current context of electricity generation. This has been mainly due to society's growing demand for energy, the quest to reduce environmental impacts and the reduction of direct and indirect costs associated with this technology. However, to install a flat and fixed photovoltaic system, a shading-free area is needed. This, in turn, has become increasingly scarce, especially in urban areas. Thus, the concept of photovoltaic solar tree is introduced, in which photovoltaic generators, in reference to the leaves of a tree, are positioned in a vertical structure similar to a trunk. The proposal for a photovoltaic system in the shape of a tree seeks to generate electricity in a reduced occupied area, in addition to being able to present a more pleasant aesthetic and enable multiple use of the site. Thus, this research sought to broaden the discussions about this type of system, presenting a review on photovoltaic solar tree focusing on modeling, simulation, topology, orientation of photovoltaic generators, constructive characteristics, solar tracking, occupied area, and multiple use. The modeling and simulations were carried out, considering the shading generated between photovoltaic cells, for two tree models, spiral and coniferous, to determine the incident solar radiation on the photovoltaic cells and, consequently, the best orientation for each one. Among the best results of the solar tree simulations, the 61-cell spiral model stands out, which proved to be up to 293.55% more efficient in terms of absorbed radiation per unit area, than the flat and fixed system of the same area. Then, prototypes of photovoltaic solar trees were designed and built-in order to validate the simulations. It was concluded that the spiral solar tree model tends to be better when the objective is to maximize the energy gain per area, while the conifer stood out for presenting smaller losses of solar radiation due to shading, when compared to the spiral model tree. However, when comparing the prototypes of solar trees with that of a flat and fixed photovoltaic system, it was found that the latter was the most efficient in generating estimated electrical energy by photovoltaic cell. The experimental results corroborated the simulated ones in their tendency to point out which were the most efficient prototypes, but not in terms of

numerical values. Emphasizing that the experimental results refer to calculations of estimates made of electric energy generation, from measured values, and the simulated values were made for annual solar radiation incident on the tree generators.

Keywords: Renewable energy. Photovoltaic generators orientation. Multiple use of photovoltaic systems. Electrical energy generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Participação de fontes renováveis na matriz elétrica no Brasil e no mundo	22
Figura 2.1 - Consumo de energia elétrica no mundo entre os anos de 1990-2018...	31
Figura 2.2 - Modelo de circuito equivalente de célula fotovoltaica	38
Figura 2.3 - Filotaxias básicas: alternadas ou espiraladas, opostas e verticiladas....	39
Figura 2.4 - Exemplo de planta com padrão de Fibonacci 5/8	41
Figura 2.5 - Projeto de árvore solar com tronco feito de bambu.....	45
Figura 2.6 - Árvore solar no CEERI, Índia	46
Figura 2.7 - (a) Modelo projetado do G.I.N.O®; (b) Protótipo construído	46
Figura 2.8 - Protótipo de árvore solar	47
Figura 2.9 - Árvore solar (a) com 8 células solares; (b) com 6 células solares	48
Figura 2.10 - Árvore solar e sistema tradicional com inclinação fixa, ambos com 6 células solares	49
Figura 2.11 - Árvore solar em escala reduzida.....	50
Figura 2.12 - Modelo de árvore solar	50
Figura 2.13 - Árvore Solar com um único módulo FV.....	51
Figura 3.1 - Ângulos da modelagem de radiação solar em uma superfície inclinada	67
Figura 3.2 - Radiação direta, difusa e refletida em uma superfície inclinada	71
Figura 3.3 - Árvore solar do modelo M1, com 16 folhas, baseada em uma planta espiralada.....	74
Figura 3.4 - Vista superior: Ilustração do distanciamento angular (d_{ang}) entre células FV sucessivas; dos pontos de origem (O_n) das três primeiras células FV; e do raio do tronco (R_t) para o modelo M1	75
Figura 3.5 - Ilustração do distanciamento vertical (d_v) entre as três primeiras células FV da árvore solar do modelo M1	76
Figura 3.6 - Árvore solar do modelo M2 baseada em uma conífera, com 25 folhas e 5 camadas.....	77
Figura 3.7 - (a) Projeção de sombra da célula FV superior na inferior. (b) Determinação da área sombreada	81

Figura 3.8 - Fluxograma para determinação da orientação e da radiação incidente em cada célula FV, e cálculo da radiação solar total na árvore do modelo M1	85
Figura 3.9 - Fluxograma para determinação da orientação e da radiação incidente em cada célula FV, e cálculo da radiação solar total na árvore do modelo M2	86
Figura 3.10 - Projeto das árvores solares do modelo M1 com os ângulos encontrados em simulação para a cidade de Viçosa – MG, com (a)16; (b) 21; (c) 25; (d) 31; (e) 41; e (f) 61 células FV	90
Figura 3.11 - Radiação solar anual para as células da árvore M1_16C, em Viçosa – MG	91
Figura 3.12 - Radiação solar anual para as células da árvore M1_61C, em Viçosa – MG	91
Figura 3.13 - Projeto das árvores solares do modelo M2 com os ângulos encontrados em simulação para a cidade de Viçosa – MG, sendo (a) 31 células FV com 5 camadas; (b) 31 células FV com 6 camadas; (c) 61 células FV com 5 camadas; e (d) 61 células FV com 6 camadas.....	97
Figura 3.14 - Radiação solar anual para as células da árvore M2_61C_5, em Viçosa – MG	98
Figura 3.15 - Radiação solar anual para as células da árvore M2_61C_6, em Viçosa – MG	98
Figura 4.1 - Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica	111
Figura 4.2 - Curva I-V de um gerador FV de silício policristalino submetido à temperatura constante de 25°C e diferentes condições de radiação solar	112
Figura 4.3 - Curva I-V de um gerador FV de silício policristalino submetido à 1000 W/m ² e diferentes condições de temperatura.....	112
Figura 4.4 - Piranômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CMP6, utilizado durante os experimentos.....	115
Figura 4.5 - Vista da placa do Arduino modelo MEGA 2560	116
Figura 4.6 - Circuito empregado na aquisição de dados de tensão e corrente para realização de teste de integridade das células FV	117
Figura 4.7 - Fluxograma do código de aquisição de dados utilizado durante os testes de integridade das células FV	119

Figura 4.8 - Montagem dos protótipos de 31 células para (a) modelo espiralada; (b) modelo conífera.....	120
Figura 4.9 - Esquema de circuito com os resistores em paralelo conectados ao terminal de um conjunto de células FV em funcionamento.....	122
Figura 4.10 - Esquema de conexão dos conjuntos em série de células FV às entradas analógicas da placa Arduino	124
Figura 4.11 - Curvas características I-V das 105 células FV testadas para a radiação de 18,67 W/m ²	125
Figura 4.12 - Protótipos desenvolvidos: (a) Sistema FV tradicional com orientação otimizada; (b) Árvore solar do modelo espiralada com 16 células; (c) Árvore solar do modelo espiralada com 31 células; e (d) Árvore solar do modelo conífera com 31 células e 6 camadas	126
Figura 4.13 - Radiação solar horária média medida na cobertura do Departamento de Engenharia Agrícola – UFV e radiação solar horária média fornecida pela Estação Climatológica Principal de Viçosa para os dias 16, 20, 21 e 29 de setembro de 2021	127
Figura 4.14 - Radiação solar horária média medida na cobertura do Departamento de Engenharia Agrícola – UFV e radiação solar horária média fornecida pela Estação Climatológica Principal de Viçosa para os dias 03, 04 e 05 de outubro de 2021	127
Figura 4.15 – Geração de energia elétrica diária estimada dos conjuntos de células FV dos protótipos	128
Figura 4.16 - Geração de energia elétrica estimada normalizada	129
Figura 4.17 - Geração de energia elétrica diária estimada para cada protótipo estudado	130
Figura 4.18 - Geração de energia elétrica diária estimada por célula FV para cada protótipo estudado.....	131
Figura 4.19 - Geração de energia elétrica diária estimada por área para cada protótipo estudado	132
Figura 4. 20 - Imagens termográficas dos protótipos em funcionamento: (a) Sistema FV tradicional com orientação otimizada; (b) Árvore solar do modelo espiralada com 16 células; (c) Árvore solar do modelo espiralada com 31 células; e (d) Árvore solar do modelo conífera com 31 células e 6 camadas	135

Figura 4.21 - (a) Imagem da célula FV sombreada do protótipo M2_31C_6: Árvore solar do modelo conífera com 31 células e 6 camadas; (b) Imagem termográfica 135

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Coeficientes de brilho em função da claridade, para céu anisotrópico no modelo de Perez	73
Tabela 3.2 - Características das árvores solares fotovoltaicas simuladas para o modelo M1 baseado em uma planta espiralada.....	75
Tabela 3.3 - Características das árvores solares fotovoltaicas simuladas para o modelo M2, baseado em uma conífera	78
Tabela 3.4 - Árvores simuladas para as cidades de Viçosa – MG, Boa Vista – RR e Chuí – RS, em que Modelo 1 refere-se a espiralada e Modelo 2 a conífera	84
Tabela 3.5 - Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 16, 21, 25 e 31 células FV do modelo M1, na cidade de Viçosa – MG	87
Tabela 3.6 - Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 41 e 61 células do modelo M1, na cidade de Viçosa - MG	88
Tabela 3.7 - Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores do modelo M1 para a cidade de Viçosa - MG	92
Tabela 3.8 - Ganho de radiação solar por área projetada para árvores do modelo M1 em relação à sistema FV de mesma área com orientação otimizada ..	94
Tabela 3.9 - Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 31 células do modelo M2, com 5 e 6 camadas, na cidade de Viçosa - MG	95
Tabela 3.10 - Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 61 células, com 5 e 6 camadas, do modelo M2, para a cidade de Viçosa - MG	96
Tabela 3.11 - Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores do modelo M2 para a cidade de Viçosa - MG	99
Tabela 3.12 - Área ocupada pelas árvores do modelo M2 e o número de células FV equivalentes, com orientação otimizada, que resultam na mesma área	100
Tabela 3.13 - Ganho de radiação solar por área projetada para árvores do modelo M2 em relação ao sistema FV de mesma área com orientação otimizada	101

Tabela 3.14 - Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores para a cidade de Viçosa – MG, com base na simulação com dados horários	103
Tabela 3.15 - Ganho de radiação solar por área projetada do protótipo simulado das árvores solares em relação ao sistema FV testemunho de mesma área, para Viçosa – MG.....	103
Tabela 4.1 - Especificações técnicas do sensor de temperatura LM35	115
Tabela 4.2 - Especificações técnicas da placa Arduino MEGA 2560	116
Tabela 4.3 - Lista do material utilizado para teste de integridade das células FV ...	117
Tabela 4.4 - Nomeação e descrição dos conjuntos com células conectadas em série	121
Tabela 4.5 - Geração de energia elétrica estimada acumulada durante os sete dias de experimentos para os conjuntos de células FV	129
Tabela 4.6 - Geração de energia elétrica estimada acumulada durante os sete dias de experimentos para os quatro protótipos	132

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
FV	Fotovoltaico.
GEE	Gases de efeito estufa.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IEA	International Energy Agency.
LDR	Light Dependent Resistor.
NREL	National Renewable Energy Laboratory.
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.
TMY	Typical Meteorological Year.
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua.

LISTA DE SÍMBOLOS

β	Ângulo de inclinação da superfície, °.
γ	Ângulo de azimute da superfície, °.
$\beta_{\acute{o}t\text{imo}}$	Ângulo de inclinação ótimo, °.
$\gamma_{\acute{o}t\text{imo}}$	Ângulo de azimute ótimo, °.
ϕ	Latitude, °.
ω	Ângulo horário, °.
ω_s	Ângulo horário do pôr do sol, °.
ω_1, ω_2	Ângulos horários, °.
n	n-ésimo dia do ano, adimensional.
δ	Declinação solar, °.
B	Variável auxiliar em função do n-ésimo dia do ano, adimensional.
θ_z	Ângulo zenital, °.
α_s	Ângulo de altitude solar, °.
γ_s	Ângulo de azimute solar, °.
I_o	Radiação extraterrestre horária, Wh/m ² .
G_{sc}	Constante solar, W/m ² .
I_{on}	Radiação extraterrestre horária no plano normal aos raios solares, Wh/m ² .
I	Radiação solar horária, Wh/m ² .
H	Radiação solar diária, Wh/m ² .
r_t	Razão da radiação solar horária pela radiação solar diária, adimensional.
a, b	Coeficientes nas relações empíricas, adimensional.
k_T	Índice de claridade horário, adimensional.
I_d	Radiação horária difusa, Wh/m ² .
I_b	Radiação horária direta, Wh/m ² .
R_b	Fator geométrico, adimensional.
a_1, a_2	Coeficientes nas relações empíricas do fator geométrico, adimensional.
$I_{b,inc}$	Radiação horária direta em uma superfície inclinada, Wh/m ² .
$I_{d,inc}$	Radiação difusa em uma superfície inclinada, Wh/m ² .
F_1, F_2	Coeficientes de brilho circunsolar e de horizonte, adimensional.

c_1, c_2	Coeficientes relacionados aos ângulos de incidência do cone de radiação circunsolar, adimensional.
ε	Clareza, adimensional.
Δ	Brilho, adimensional.
$I_{b,n}$	Radiação horária direta em um plano normal aos raios solares, Wh/m ² .
m	Massa de ar, adimensional.
h	Altitude, m.
$f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{21}, f_{22}, f_{23}$	Coeficientes de brilho, adimensional.
ρ_g	Refletividade do solo, adimensional.
$I_{ref,inc}$	Radiação horária refletida na superfície inclinada, Wh/m ² .
I_T	Radiação horária total, Wh/m ² .
O_n	Ponto de origem de uma célula n , adimensional.
R_t	Raio do tronco, m.
d_v	Distanciamento vertical, m.
d_{ang}	Distanciamento angular, °.
n_{panels}	Número total de células/módulos FV na árvore solar, adimensional.
P_A, P_B, P_C, P_D	Vértices da célula superior, adimensional.
P_P, P_Q, P_R, P_S	Vértices da célula inferior, adimensional.
L	Comprimento da célula FV, m.
W	Largura da célula FV, m.
A_{cel}	Área da célula, m ² .
\vec{s}	Vetor dos raios solares, adimensional.
S_A, S_B, S_C, S_D	Pontos no espaço por onde passam os segmentos de reta dos raios solares referentes aos vértices da célula superior, adimensional.
I_A, I_B, I_C, I_D	Vértices da sombra gerada, adimensional.
\vec{n}	Vetor normal à célula inferior, adimensional.
A_{M1}	Área circular ocupada pela árvore do modelo espiralado, m ² .
A_{M2}	Área circular ocupada pela árvore do modelo conífero, m ² .
x	Percentual específico de incremento dos galhos em cada árvore, %.
C_{gm}	Comprimento do galho maior da árvore conífera, m.
C_a	Camada atual da célula, adimensional.
\vec{u} e \vec{w}	Vetores auxiliares, adimensional.

S	Percentual de área sombreada da célula FV, %.
n_v	Número de voltas até a folha se sobrepor à primeira, adimensional.
n_f	Número de folhas por período, adimensional.
V_{CA}	Tensão de circuito aberto, V.
I_{CC}	Corrente de curto-circuito, A.
P_{MP}	Ponto de máxima potência, W.
I_{MP}	Corrente de máxima potência, A.
V_{MP}	Tensão de máxima potência, V.
V_{A2}	Tensão na entrada analógica A2, V.
R	Resistência, Ω .
G	Radiação incidente sobre o gerador, W/m^2 .
G_{STC}	Radiação na condição <i>STC</i> , igual a $1000 W/m^2$.
I_{STC}	Corrente de curto-circuito na condição <i>STC</i> , A.
P_{con}	Potência no conjunto em série de células FV, W.
n_c	Número de células FV que formam o conjunto em série, adimensional.
P_{nom}	Potência nominal de cada célula FV, W.

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	22
1.1. Introdução geral	22
1.2. Objetivos	24
1.3. Estrutura da dissertação.....	25
1.4. Limitações da pesquisa.....	26
1.5. Contribuições da pesquisa	27
1.6. Referências bibliográficas	27
2. ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA: UMA REVISÃO.....	30
2.1. Resumo.....	30
2.2. Introdução	30
2.3. Metodologia.....	33
2.4. Resultados e discussão	34
2.4.1. Modelagem e Simulação	35
2.4.2. Topologia	39
2.4.3. Orientação dos geradores fotovoltaicos.....	43
2.4.4. Características construtivas.....	44
2.4.5. Rastreamento solar.....	52
2.4.6. Área ocupada	53
2.4.7. Uso múltiplo	54
2.5. Conclusão	56
2.6. Referências Bibliográficas.....	57
3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM DIFERENTES MODELOS DE ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA	62
3.1. Resumo.....	62
3.2. Introdução	62
3.3. Material e métodos.....	66
3.3.1. Modelagem da radiação solar incidente em árvores solares fotovoltaicas	66
3.3.2. Simulação da radiação solar incidente em árvores solares fotovoltaicas	83
3.4. Resultados e discussão	87
3.5. Conclusão	104
3.6. Referências bibliográficas	106

4. DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS DE ÁRVORES SOLARES FOTOVOLTAICAS	109
4.1. Resumo	109
4.2. Introdução	110
4.3. Material e métodos.....	113
4.3.1. Teste de integridade das células fotovoltaicas	114
4.3.2. Construção dos protótipos	119
4.3.3. Experimentos	122
4.4. Resultados e discussão	124
4.5. Conclusão	136
4.6. Referências bibliográficas	137
5. CONCLUSÕES GERAIS.....	140
5.1. Conclusões	140
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	141
APÊNDICE A.....	143
APÊNDICE B.....	155

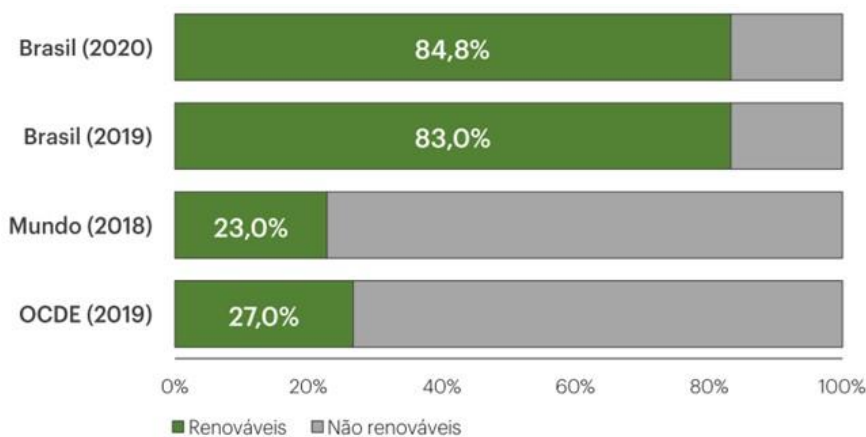
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Introdução geral

O acesso à eletricidade tem sido um dos fatores decisivos para o mundo alcançar o atual nível de desenvolvimento tecnológico e social. O consumo de energia elétrica é observado atrelado aos parâmetros socioeconômicos de um país e é determinado pelas demandas relacionadas ao desenvolvimento e bem-estar da sociedade (AZAM et al., 2016; FERREIRA et al., 2018). De acordo com dados da *International Energy Agency* (2020), o consumo anual mundial de energia elétrica aumentou cerca de 3,2% ao ano, entre os anos de 1998 e 2018. No Brasil, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica tem aumentado ainda mais nos últimos anos e estima-se um crescimento médio de 3,7% ao ano, de 2016 a 2026 (EPE, 2017).

Uma alternativa para suprir a crescente demanda de energia elétrica, diversificar a matriz elétrica e, ao mesmo tempo, gerar energia com impactos ambientais reduzidos, é a utilização da geração por meio de fontes renováveis, como a hidráulica, solar, eólica e biomassa (ABDMOULEH et al., 2017). A participação dessas fontes na matriz elétrica brasileira atingiu 84,8% em 2020, mais que o triplo da média mundial ou da média dos países membros da OCDE (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico), como mostrado na Figura 1.1 (EPE, 2021).

Figura 1.1 - Participação de fontes renováveis na matriz elétrica no Brasil e no mundo



Fonte: EPE (2021).

Dentre as fontes renováveis de energia, destaca-se a geração por meio da energia solar fotovoltaica, com um aumento de 61,5% no Brasil entre os anos de 2019 e 2020, passando de 6655 GWh para 10750 GWh (EPE, 2021). Esse aumento pode ser justificado por ser uma fonte inesgotável na escala de tempo humano, pelos baixos impactos ambientais e, principalmente, pelo fator econômico, com a redução significativa de custos relacionados à essa tecnologia no decorrer dos anos (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017; FERREIRA et al., 2018; KAFKA; MILLER, 2020). Além do mais, a modularidade da energia solar fotovoltaica facilita investimentos na geração nas proporções possíveis, mesmo que sejam relativamente pequenas (FERREIRA et al., 2018).

Projetar sistemas fotovoltaicos personalizados pode ser uma tarefa muitas vezes complexa, a qual exige que os profissionais qualificados levem em consideração fatores como: tamanho e orientação do sistema; carga instalada e tempo de uso; clima e radiação solar local; e distribuição e capacidade da rede (PINHO; GALDINO, 2014). A área disponível para a instalação de uma usina solar fotovoltaica tradicional também é considerada um fator limitante para o projeto (FIGUEIREDO, 2015).

Em sistemas rurais, por exemplo, os módulos fotovoltaicos são normalmente instalados ocupando áreas que poderiam ser destinadas à produção agrícola. Em alguns casos, já se estuda o uso múltiplo do espaço, no qual os módulos são instalados em estruturas elevadas, sob as quais algumas plantações são cultivadas. Dependendo do nível de sombra permitido pelo padrão de instalação, as culturas sob os módulos fotovoltaicos podem ser tão produtivas ou até mais do que as plantações em pleno sol (MAJUMDAR; PASQUALETTI, 2018).

Já em sistemas urbanos, os geradores fotovoltaicos são usualmente instalados sobre o telhado. Entretanto, esta área disponível pode não ser suficiente para instalar uma usina que supra a demanda energética de um edifício, como é o caso de habitações verticais com multiusuários. De acordo com os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD), o percentual de habitações brasileiras configuradas como apartamentos cresceu de 13,21% para 14,20% entre 2017 e 2019 (IBGE, 2018; IBGE, 2020). Este valor pode atingir mais de 40% das habitações em grandes cidades (IBGE, 2019). Segundo Villa et al. (2018), o número de brasileiros que moram em apartamentos tem aumentado nas últimas décadas,

principalmente em cidades de médio e grande porte, solidificando esta categoria habitacional nos cenários urbanos.

Portanto, é de grande relevância projetar sistemas fotovoltaicos que consigam atender a demanda energética desses locais e, simultaneamente, satisfazer as restrições de área disponível. Desta forma, propõe-se uma alternativa de posicionamento de geradores fotovoltaicos em analogia às folhas de uma árvore, buscando maximizar a geração de energia elétrica em uma determinada área ocupada. Este modelo, conhecido como Árvore Solar Fotovoltaica, ou apenas Árvore Solar (do inglês, *Solar Tree*), corresponde a uma estrutura que se assemelha a uma árvore, em que os geradores fotovoltaicos substituem as folhas e coletam a energia solar para gerar eletricidade (GANGWAR et al., 2018; OLUWAFEMI; LASEINDE; SALAU, 2019; DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2020).

Essa árvore, utilizada para geração de energia, também se destaca no contexto estético e de conscientização ambiental. Ela pode, por exemplo, ser instalada em praças e jardins, sendo utilizada como uma estrutura decorativa e ao mesmo tempo, fonte de energia renovável, como foi o caso da “*OPTree*”, árvore instalada pela empresa *Sunew* no *Rock in Rio* de 2017 (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018; SUNEW, 2020).

No entanto, mesmo já existindo alguns modelos de árvores sendo desenvolvidos, observa-se na literatura que muitos ainda são direcionados aos conceitos de manifestação artística e conscientização ambiental, e poucos são voltados à maximização da geração de energia elétrica por área. Verifica-se a necessidade de pesquisas que analisem variáveis como o modelo geral da árvore, incluindo a filotaxia ou distribuição das folhas, orientação dos geradores fotovoltaicos, radiação solar incidente e área ocupada pela estrutura, de modo a permitir o desenvolvimento de árvores solares que maximizem a geração de energia elétrica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Modelar, simular e desenvolver protótipos de árvores solares fotovoltaicas maximizando a geração de energia por área ocupada.

1.2.2. Objetivos específicos

- i. Realizar estudo do estado da arte sobre o desenvolvimento de árvores solares fotovoltaicas;
- ii. Modelar e simular diferentes protótipos de árvores solares de forma a maximizar a radiação incidente nas folhas/células fotovoltaicas por área ocupada;
- iii. Validar experimentalmente os dados simulados desenvolvendo protótipos de modelos de árvores solares fotovoltaicas.

1.3. Estrutura da dissertação

Essa dissertação contém cinco capítulos.

No Capítulo 1 foi desenvolvida a introdução geral do tema abordado, bem como os objetivos, as contribuições e limitações da pesquisa.

No Capítulo 2 foi realizada uma pesquisa do estado da arte sobre árvore solar fotovoltaica. Foram levantados parâmetros relevantes a serem analisados durante o desenvolvimento e projeto de uma árvore solar fotovoltaica, como: modelagem e simulação, topologia, orientação dos geradores fotovoltaicos, características construtivas, rastreamento solar, área ocupada e uso múltiplo.

No Capítulo 3 foram desenvolvidas modelagens e simulação da radiação solar incidente em diferentes modelos de árvores solares fotovoltaicas, sendo eles: espiralada e conífera. A simulação foi desenvolvida para as cidades de Viçosa – MG, Boa Vista – RR e Chuí – RS. Buscou-se a orientação de cada folha/célula fotovoltaica, considerando o ângulo de inclinação e o ângulo de azimute, com o objetivo de reduzir o sombreamento gerado entre células FV e conseqüentemente, maximizar a radiação solar anual incidente nas árvores.

No Capítulo 4 foram construídos três protótipos de árvore solar fotovoltaica em pequena escala, com o intuito de validar os resultados obtidos durante a simulação. Além disso, construiu-se um protótipo de um sistema fotovoltaico tradicional com orientação fixa otimizada que serviu como testemunho para fins de comparação. Todos os protótipos foram projetados, construídos e instalados no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa – MG.

No Capítulo 5 são apresentadas a conclusão geral e as sugestões para trabalhos futuros.

1.4. Limitações da pesquisa

As pesquisas realizadas no Capítulo 2 foram limitadas a trabalhos científicos mais recentes, abrangendo artigos publicados nos últimos seis anos, entre 2016 e 2021. Não foram analisados banco de patentes.

As simulações realizadas no Capítulo 3 não consideraram o sombreamento gerado pelo tronco e galhos. Todas as simulações foram realizadas baseadas nas dimensões das células fotovoltaicas utilizadas para a construção dos protótipos, descritas no Capítulo 4. O diâmetro do tronco e altura total das árvores solares tiveram valores fixos para todas as simulações. Foram simuladas as árvores dos modelos propostos, espiralada e conífera, com 16, 21, 25, 31, 41 e 61 células FV, sendo que as simulações do modelo conífera foram realizadas para árvores com cinco e seis camadas de células fotovoltaicas. Foram realizadas simulações com base nos dados de média mensal da radiação solar diária para as cidades de Viçosa – MG, Boa Vista – RR e Chuí – RS. As simulações com dados de radiação solar horária somente foram realizadas para as árvores dos modelos espiralada e conífera com 16 e 61 células fotovoltaicas, para a cidade de Viçosa – MG, pois a execução do *software* demandava dias para uma única simulação.

No Capítulo 4 foram descritos a construção e os testes dos protótipos. Os protótipos foram experimentados por apenas sete dias, nos meses de setembro e outubro de 2021. Devido à falta de dados técnicos referente às células fotovoltaicas utilizadas, foi considerado que a corrente de curto-circuito é proporcional a corrente de máxima potência, esta última, fornecida pelo fabricante. Além disso, devido a inviabilidade e complexidade de se realizar o rastreamento do ponto de máxima transferência de potência para cada célula fotovoltaica, foi realizada uma estimativa de energia elétrica gerada em função da corrente calculada durante os experimentos. Assim, construiu-se conjuntos associando células FV em série para realizar a medição da tensão nos terminais de cada conjunto. Entretanto, cada célula FV foi afetada individualmente por diferentes formas de sombreamento, interferindo, de alguma maneira, na geração de energia elétrica do seu respectivo conjunto. Não foi utilizado nenhum sistema de rastreamento solar, ou seja, todas as células fotovoltaicas tiveram orientações fixas de acordo com a simulação realizada para uma otimização anual.

1.5. Contribuições da pesquisa

Este trabalho propôs dar continuidade à pesquisa desenvolvida por Pinto (2018) e discutir uma diferente alternativa de se construir um sistema solar fotovoltaico, inspirando-se em modelos de árvores. Foram levantados alguns parâmetros considerados relevantes para se analisar ao realizar o projeto de uma árvore solar fotovoltaica, como: (i) modelagem e simulação; (ii) topologia; (iii) orientação dos geradores fotovoltaicos; (iv) características construtivas; (v) rastreamento solar; (vi) área ocupada; e (vii) uso múltiplo.

Foi sugerido uma modelagem de radiação solar incidente para dois modelos distintos de árvore solar fotovoltaica, sendo eles espiralada e conífera. Essa modelagem compreendeu o cálculo de radiação solar incidente em superfícies inclinadas, posicionamento espacial das folhas/células fotovoltaicas e cálculo de sombreamento gerado entre folhas/células fotovoltaicas.

Ressalta-se que na literatura consultada não foi explicitado por nenhum pesquisador/artigo se houve otimização da geração de energia elétrica por meio de diferentes modelos da árvore FV. Também não foi constatado trabalhos que abordassem a determinação da orientação de geradores fotovoltaicos para otimizar a área ocupada em árvores solares, e nem que implementassem o uso de um dispositivo seguidor do ponto de máxima transferência de potência (SMTP).

1.6. Referências bibliográficas

ABDMOULEH, Z.; GASTLI, A.; BEN-BRAHIM, L.; HAOUARI, M.; AL-EMADI, N. A. Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources. **Renewable Energy**, v. 113, p. 266-280, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>. Acesso em 11 fev. 2021.

AZAM, M.; KHAN, A. Q.; ZAFEIRIOU, E.; ARABATZIS, G. Socio-economic determinants of energy consumption: An empirical survey for Greece. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1556–1567. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.082>. Acesso em: 19 jun. 2021.

DEY, S.; LAKSHMANAN, M. K.; PESALA, B. Tuning the solar power generation curve by optimal design of solar tree orientations. **Advances in Energy Research**. India, v. 1, p. 461-469, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2666-4_45. Acesso em: 15 ago. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017 - 2026)**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>. Acesso em: 06 mar. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional - BEN. Relatório Síntese**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 10 out. 2021.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; SANTOS, G. R.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181-191, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>. Acesso em: 15 jun. 2021.

FIGUEIREDO, R. V. P. **Potencial solar de parques de estacionamento para carregamento de veículos elétricos**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa. Portugal, p. 99. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/20289?locale=en>. Acesso em: 10 abr. 2021.

GANGWAR, P.; SINGH, R.; TRIPATHI, R. P.; SINGH, A. K. Effective solar power harnessing using a few novel solar tree designs and their performance assessment. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental**. p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549162>. Acesso em: 03 mar. 2021.

HYDER, F.; SUDHAKAR, K.; MAMAT, R. Solar PV tree design: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1079-1096, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.025>. Acesso em: 06 dez. 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Características gerais dos domicílios e dos moradores 2017 - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua**. p. 1-8. 2018. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101566>. Acesso em 22 mai. 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua Anual**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnadca/tabelas>. Acesso em: 21 out. 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Características gerais dos domicílios e dos moradores 2019 - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua**. p. 1-8. 2020. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101707_informativo.pdf. Acesso em: 22 mai. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics – Energy consumption. **IEA**, 2020. Disponível em: www.iea.org/data-and

[statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=Electricity%20consumption%20per%20capita](#). Acesso em: 18 mai. 2021.

KAFKA, J.; MILLER, M. A. The dual angle solar harvest (DASH) method: An alternative method for organizing large solar panel arrays that optimizes incident solar energy in conjunction with land use. **Renewable Energy**. USA, v. 155, p. 531-546, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.025>. Acesso em: 22 mai. 2021.

MAJUMDAR, D.; PASQUALETTI, M. J. Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. **Landscape and Urban Planning**, v. 170, p. 150-168, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.011>. Acesso em: 22 mai. 2021.

OLUWAFEMI, I.; LASEINDE, T.; SALAU, A. O. Design and construction of a 0.5 kW solar tree for powering farm settlements. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)**, v. 10, n. 06, p. 19-33. 2019. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3451085. Acesso em: 23 mar. 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPTEL - CRESESB, p. 1-529. 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/Manual_de_Engenharia_FV_2014. Acesso em: 10 nov. 2020.

PINTO, A. C. V. **Desenvolvimento de um protótipo de árvore fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/22199>. Acesso em: 06 out. 2021.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 74, p. 590-601. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>. Acesso em: 27 abr. 2021.

SUNEW. Greenest Energy Everywhere. Disponível em: <https://sunew.com.br/cases/optree/>. Acesso em: 20 abr. 2021.

VILLA, S. B.; SARAMAGO, R. de C. P.; CARDOSO, C. C. M.; PAULINO, M. J. de A. Habitar vertical: avaliação da qualidade espacial e ambiental de edifícios de apartamentos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, p. 519-538. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000100236>. Acesso em: 16 abr. 2021.

2. ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA: UMA REVISÃO

2.1. Resumo

A geração de energia solar fotovoltaica tem aumentado significativamente nos últimos anos. Isso ocorre, principalmente, devido à crescente demanda da sociedade por energia elétrica, à necessidade de redução dos impactos ambientais e à diminuição dos custos relacionados a essa tecnologia. Para a instalação de um sistema fotovoltaico com geradores fixos e planos, é necessária uma significativa área livre de sombreamento, e esta, por sua vez, vem se tornando cada vez mais escassa, especialmente no meio urbano. Uma estratégia usada para aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos reduzindo-se a área ocupada e otimizando os ângulos de orientação dos geradores é a árvore solar fotovoltaica. Por meio de uma revisão bibliográfica, foram analisados diferentes trabalhos relacionados às árvores solares fotovoltaicas, observando-se a modelagem, simulação, topologia, orientação dos geradores, características construtivas, rastreamento solar, área ocupada e uso múltiplo. Verificou-se que a árvore solar fotovoltaica é um interessante meio de geração de energia renovável para locais onde não há grandes áreas disponíveis, além de poder ser conciliada com outros fins, como agricultura e estacionamento a céu aberto. Por último, concluiu-se que ainda não existem estudos disponíveis na literatura sobre a otimização da geração fotovoltaica por área para diferentes modelos de árvores.

Palavras-chave: arranjo espacial de geradores fotovoltaicos, filotaxia, sequência de Fibonacci, energia renovável.

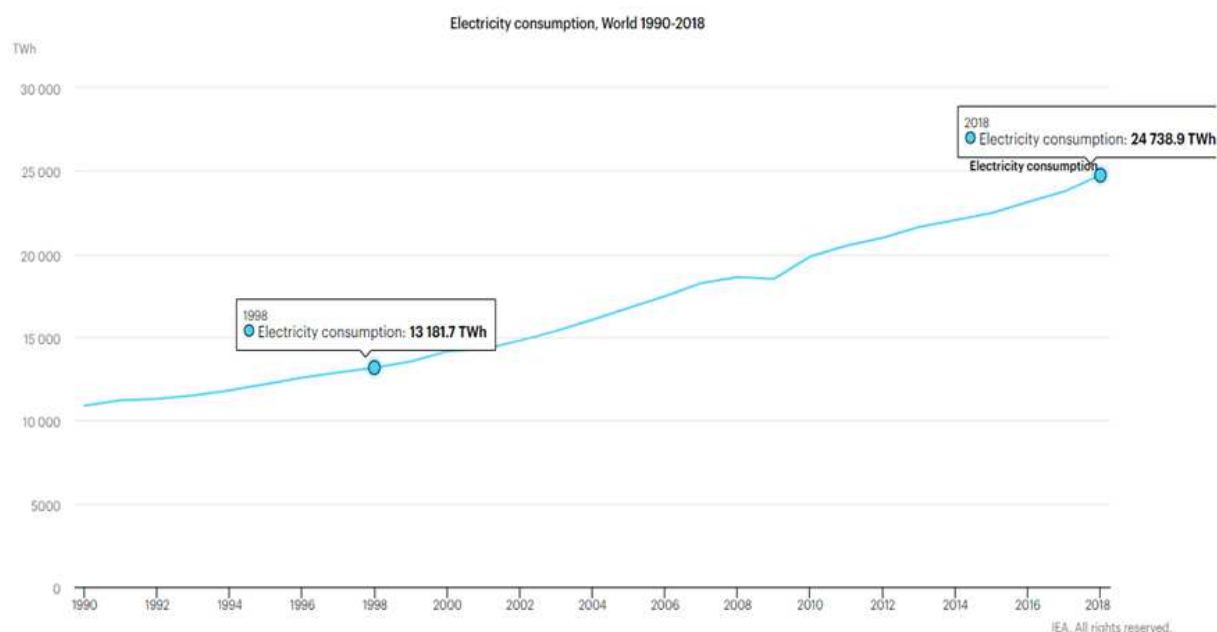
2.2. Introdução

A utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia vem causando sérios danos ao meio ambiente devido à emissão de gases de efeito estufa (GEE's) relacionados à problemática do aquecimento global, das mudanças climáticas, poluição do ar, chuvas ácidas, entre outros (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017; RAD et al., 2020). Em contrapartida, o emprego das fontes renováveis para geração de energia se mostra essencial para mitigar os problemas ambientais, e principalmente, para

atender à crescente demanda de energia do mundo, visto que os recursos não renováveis são esgotáveis (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017; DUPONT; KOPPELAAR; JEANMART, 2020).

Segundo os dados da *International Energy Agency* (2020), o consumo anual mundial de energia elétrica passou de 13181,7 TWh em 1998 para 24738,9 TWh em 2018, representando um aumento aproximado de 3,2% ao ano, no período (Figura 2.1). Neste mesmo intervalo de tempo, houve um crescimento de cerca de 2,3% ao ano na emissão de CO₂ devido à geração de eletricidade e produção de calor. Assim, torna-se indispensável reconhecer a grande importância do uso dos recursos renováveis para colaborar em suprir a demanda de energia elétrica e reduzir os impactos ambientais nos próximos anos.

Figura 2.1 - Consumo de energia elétrica no mundo entre os anos de 1990-2018



Fonte: IEA (2020).

Existe uma série de pesquisas com foco nas mais diversas fontes de energia renovável (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2020). A utilização da energia solar por meio de células fotovoltaicas (FV) é considerada uma das áreas mais promissoras neste ramo de pesquisa (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017; RACHARLA; RAJAN, 2017). Os principais estudos relacionados à energia solar estão associados com a melhoria da eficiência das células fotovoltaicas (NAYAK et al., 2019; LI et al., 2020; YU et al., 2020) e dos componentes eletrônicos utilizados nos sistemas fotovoltaicos

(ALHAMROUN et al., 2019; PATEL; GUPTA; BABU, 2019). Ademais, várias pesquisas estão focadas no uso eficaz dos geradores FV, empregando métodos de rastreamento solar e de otimização do ângulo de inclinação (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2020).

Alguns sistemas fotovoltaicos são projetados para rastrear a trajetória do sol, mantendo os geradores FV em um ângulo reto em relação aos raios solares de modo a capturar uma maior radiação solar e, conseqüentemente, aumentar a geração de energia elétrica. Os rastreadores uniaxiais têm apenas um grau de liberdade e atuam com um eixo em rotação. O ganho da geração nesses sistemas pode ser de aproximadamente 30% se comparado com um sistema FV horizontal fixo (RACHARLA; RAJAN, 2017).

Já os rastreadores biaxiais possuem dois graus de liberdade que agem como eixos de rotação perpendiculares entre si e requerem um controle mais complexo. Os sistemas com este rastreamento podem ser até 17% mais eficientes que os sistemas com rastreadores uniaxiais (AWASTHI et al., 2020). Entretanto, ambos os sistemas com rastreadores aumentam significativamente o custo do sistema porque são mais caros e exigem manutenção (PATIL; MADIWAL, 2016).

Uma alternativa utilizada para aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos por meio da otimização dos ângulos de inclinação e da redução da área ocupada é a árvore solar fotovoltaica. Do inglês, "*Solar Tree*", que significa "Árvore Solar", no qual *TREE* forma o acrônimo "*T=Tree generating; R=Renewable; E=Energy; and E=Electricity*", isto é, árvore gerando energia renovável e eletricidade, no português (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018).

A árvore solar fotovoltaica é composta, basicamente, por uma estrutura de sustentação e geradores fotovoltaicos, convenientemente conectados. A estrutura está associada aos troncos e galhos de uma árvore, enquanto os geradores estão correlacionados às folhas, dispostos e suspensos nos galhos. É uma analogia às árvores encontradas na natureza, porém, com geradores FV em vez de folhas (DEEP; MISHRA; AGARWAL, 2020).

Em comparação com os sistemas com geradores FV de orientação única, a principal vantagem de uma árvore solar fotovoltaica é a possibilidade de se otimizar a orientação dos geradores FV de forma individual. Com essa característica, é possível que as curvas de geração de energia sejam otimizadas em determinados períodos

desejados. Por exemplo, consegue-se aumentar a geração de energia durante os meses de inverno (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2020).

Assim, com uma melhor orientação e distribuição desses geradores FV sobre a estrutura da árvore, consegue-se obter uma maior geração de energia, ocupando uma menor área, se comparado com um sistema FV fixo e plano (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2018). Essa redução na área ocupada é pertinente, visto que, para se instalar uma usina fotovoltaica, são necessárias grandes áreas que devem ser, dentro do possível, livres de somreamento. E estas, por sua vez, são em muitas situações escassas (GANGWAR et al., 2019).

Em zonas urbanas, o aumento do número de edifícios tende a restringir a disponibilidade de superfícies sem sombras. As áreas disponíveis em telhados, local onde normalmente os geradores FV são instalados, podem não ser suficientes para implantar uma usina que atenda a demanda energética do próprio edifício. Já em zonas rurais, a instalação desses sistemas reduz o espaço útil que poderia ser destinado à produção agrícola (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2020).

Alguns trabalhos já foram realizados recentemente visando a concepção do projeto de árvore solar utilizando diferentes abordagens, envolvendo: (i) Radiação incidente e geração solar: simulação da radiação incidente nas superfícies das folhas, e simulação do comportamento do circuito equivalente de um diodo dos geradores fotovoltaicos; (ii) Estrutura de sustentação: simulação do comportamento da estrutura de sustentação das árvores em tronco, ramos e folhas; (iii) Protótipos: construção e testes de protótipos com e sem rastreamento, em escala reduzida e em escala real.

Desta forma, o objetivo desta pesquisa foi realizar um levantamento do estado da arte sobre o desenvolvimento de árvores solares fotovoltaicas. Parâmetros de projeto foram analisados visando avaliar as tendências dessa linha de pesquisa. Ainda, foram apontados desafios e oportunidades recorrentes nos estudos e sugestões que possam contribuir com o desenvolvimento desse tema.

2.3. Metodologia

Inicialmente, foram realizadas pesquisas na literatura sobre árvores solares fotovoltaicas, observando suas relevâncias acadêmicas, tecnológicas e sociais, de forma a gerar um conhecimento estruturado sobre o tema em análise. Estas pesquisas foram efetivadas por meio de buscadores de trabalhos científicos como o Google

Acadêmico, *ScienceDirect*, das mais relevantes publicações científicas atuais, em bancos de teses e dissertações, de modo a obter resultados confiáveis que servissem de base sobre o tema.

Foram definidas algumas palavras-chave como “*solar tree*”, “*PV tree*”, “*solar PV system*”, “*phyllotaxy patterns*” e “*agrivoltaic systems*” para facilitar a pesquisa e encontrar material bibliográfico sobre o assunto. Também, buscou-se trabalhos relacionando a eficiência da árvore solar e/ou usina fotovoltaica com a produção agrícola localizada no entorno e abaixo desses sistemas, bem como estacionamento solar e usinas flutuantes.

A busca foi limitada a trabalhos científicos mais recentes, publicados nos últimos seis anos, entre 2016 e 2021. Após selecionar os documentos relevantes para o estudo, criou-se uma biblioteca e os classificou de acordo com a estrutura e conteúdo abordado. Destacou-se alguns pontos relevantes como: (i) modelagem e simulação, (ii) topologia, (iii) orientação dos geradores FV, (iv) características construtivas, (v) rastreamento solar e (vi) área ocupada e (vii) uso múltiplo.

2.4. Resultados e discussão

Após pesquisar e filtrar os materiais encontrados, observou-se que o número de trabalhos desenvolvidos relacionados ao tema tem aumentado, ainda que modestamente, nos últimos seis anos. Entretanto, não foram encontrados mais do que 30 trabalhos, incluindo artigos, teses e dissertações.

Considerando a origem onde os artigos foram desenvolvidos, constatou-se que 72% foram realizados na Índia. Outros países que também publicaram na área foram Alemanha, Bangladesh, Brasil, Indonésia, Nigéria, Tailândia e Colômbia. Com exceção da Alemanha, todos estes países possuem pelo menos uma região territorial pertencente à zona tropical, isto é, entre o Trópico de Câncer (23°27' N) e o Trópico de Capricórnio (23°27' S). Esse fato indica uma tendência dos pesquisadores desses países de buscarem alternativas para otimizar a geração de energia por meio de sistemas fotovoltaicos. Ressalta-se que a Zona Tropical é a região com maior incidência solar no globo.

2.4.1. Modelagem e Simulação

Dey, Lakshmanan e Pesala (2018) propuseram um ajuste específico da curva de geração de energia orientando adequadamente os geradores FV de uma árvore solar. Para isso, foram usados modelos analíticos detalhados combinados com algoritmos genéticos multiobjetivos para otimizar a orientação dos geradores FV e minimizar os efeitos de sombreamento entre eles.

Inicialmente, os autores determinaram a radiação incidente $I(\beta, \gamma)$ em uma superfície inclinada (Equação 2.1) descrita pelo ângulo de inclinação (β) e ângulo de azimute (γ), seguindo o modelo isotrópico de Liu-Jordan.

$$I(\beta, \gamma) = I_b \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} + I_d \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.1)$$

em que, I_b é a radiação solar direta horária em superfície horizontal (W/m^2), I_d é a radiação solar difusa horária em superfície horizontal (W/m^2), θ_i é o ângulo de incidência ($^\circ$) e θ_z é o ângulo de zênite ($^\circ$) (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2018).

Dey, Lakshmanan e Pesala (2018) variaram β entre 0° e 90° e γ entre 0° e 360° , ambos em intervalos de $0,01^\circ$, até encontrar os valores de $\beta_{\text{ótimo}}$ e $\gamma_{\text{ótimo}}$, com os quais obtiveram os maiores índices de radiação incidente na superfície analisada.

A soma dos valores diários de energia incidente durante 365 dias, resulta na energia anual incidente, $E(\beta, \gamma)$, para uma superfície com orientação (β, γ), conforme mostrado na Equação 2.2. Considerou-se a radiação global incidente para cada hora no intervalo de 7 às 17 horas (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2018).

$$E(\beta, \gamma) = \sum_{\text{dia}=1}^{365} \sum_{7h}^{17h} I_{(h,\text{dia})}(\beta, \gamma) \quad (2.2)$$

Por sua vez, a perda de energia por sombreamento, E_l , foi dada pela Equação 2.3.

$$E_l = \sum_{h=7h}^{17h} I_b(\beta, \gamma) \eta_e A_h \quad (2.3)$$

Onde η_e representa a eficiência do gerador fotovoltaico e A_h é a área sombreada do gerador. Os autores não mencionaram se consideraram a degradação anual do gerador fotovoltaico. Entretanto, deve-se salientar que, segundo Sun, Chavali e Alam (2018), os módulos fotovoltaicos se degradam a uma taxa de aproximadamente 0,7% ao ano. Por sua vez, A_h foi determinada projetando a área de um gerador sobre o outro, considerando o vetor de direção dos raios solares. Assim, conseguiram posicionar a quantidade de geradores FV desejados de modo que a sombra de um gerador não reduza significativamente a geração de energia dos outros geradores FV (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2018).

Por fim, com as orientações dos geradores FV já determinadas, validou-se o modelo por meio de uma comparação com simulações de raio óptico usando o ZEMAX® (*software* de design óptico). Os geradores FV tiveram suas superfícies subdivididas em pixels de 1 mm² de modo que a intensidade da luz pudesse ser verificada em toda a superfície. As simulações foram realizadas em um dia de cada mês, para três horários distintos: 9h, 12h e 15h (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2018). Todavia, observa-se que a realização de simulação em mais horários do dia proporcionaria maior confiabilidade aos resultados obtidos, pois durante o período entre os instantes analisados poderia haver grandes mudanças nos valores de radiação incidente.

Apenas a radiação direta foi empregada para essas simulações, pois considerou-se que a radiação difusa não contribuía para as perdas por sombreamento. Os valores de radiação solar nos geradores FV com a simulação pelo ZEMAX® tiveram uma excelente correlação com os resultados do MATLAB®, validando as simulações (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2018).

Também utilizando o modelo isotrópico de Liu-Jordan para determinar os valores de radiação solar direta e difusa incidentes em uma superfície inclinada, Dey, Lakshmanan e Pesala (2020) projetaram modelos de árvores solares para sete localidades. No entanto, eles afirmaram que essa metodologia de projeto é genérica e pode ser aplicada a outras localizações geográficas, desde que realizadas algumas adaptações.

O objetivo dos autores foi ajustar a curva de energia gerada ao longo do ano de acordo com as necessidades. Para isso, eles simularam a radiação solar incidente variando os ângulos β e γ de forma que obtivessem um aumento de energia no período desejado do ano, sem que houvesse muita perda de energia no período restante. Assim, eles conseguiram determinar a orientação de cada um dos geradores fotovoltaicos. Por fim, calculou-se a energia incidente nos meses desejados e a energia incidente média anual (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2020).

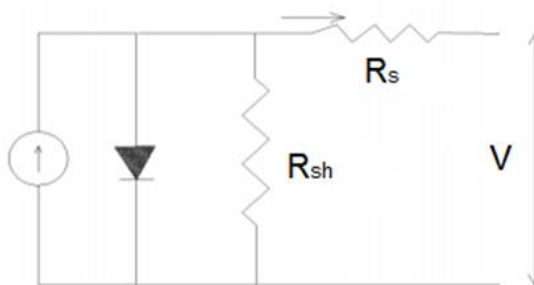
Visando maximizar a energia gerada e reduzir o custo estrutural de uma árvore solar, Dey e Pesala (2020) não só simularam as orientações dos geradores FV de modo análogo ao trabalho de Dey, Lakshmanan e Pesala (2018), como também simularam a estrutura física da árvore solar. A fim de reduzir a massa estrutural do sistema, garantindo a integridade da estrutura em altas velocidades do vento, os autores fizeram uma modelagem de elementos finitos de modo a analisar a tensão de von Mises atuando na estrutura. Com base nos critérios de von Mises, as dimensões e massas do tronco e dos galhos da árvore solar foram otimizadas individualmente.

Também visando a parte estrutural, Shanmukhi et al. (2019) projetaram diferentes modelos de árvores empregando o programa Creo Parametric 2.0. Por meio do *software* ANSYS 16.2, os autores realizaram uma análise estrutural estática, em que foram calculados deformação, tensão de von Mises, tensão de cisalhamento e outros.

Por sua vez, Kishore et al. (2019) simularam o posicionamento dos cinco geradores FV de suas árvores por meio do método empregado por Dey, Lakshmanan e Pesala (2018) e implementaram um sistema *IoT* (*Internet of Things*) para monitorar a energia gerada pela árvore solar.

Com uma outra abordagem, Deep, Mishra e Agarwal (2020) inicialmente utilizaram o *software* MATLAB®/Simulink para modelar e simular uma célula fotovoltaica empregada na árvore solar. Para isso, eles representaram a célula como um circuito equivalente de um diodo, como mostrado na Figura 2.2, e calcularam os valores de corrente e tensão de modo a esboçar as curvas características P-V e I-V. Os valores de potência de saída da árvore foram estimados por meio dos programas de simulação de sistemas fotovoltaicos PVgis e PVsyst.

Figura 2.2 - Modelo de circuito equivalente de célula fotovoltaica



Fonte: Deep, Mishra e Agarwal (2020).

Gupta (2017) e Duque et al. (2017) desenvolveram pesquisas semelhantes. Inicialmente, os autores calcularam o consumo diário de energia elétrica em suas instalações. Em seguida, especificaram os componentes necessários para a implementação de um sistema fotovoltaico do tipo árvore, como banco de baterias, quantidade, disposição física e potência dos geradores fotovoltaicos, bem como, controladores de cargas e inversores. Após essas especificações, Duque et al. (2017) projetaram a árvore solar fotovoltaica por meio dos *softwares* Solid Edge ST9, SOLIDWORKS 2017, Luxion Keyshot 6, CorelDRAW X8 e Microsoft Visio 2016. Entretanto, ambos os trabalhos não simularam a radiação incidente nos geradores FV nem otimizaram a orientação deles.

Apesar da simulação ser um recorte parcial de uma situação real, ela é um recurso relevante que auxilia a caracterizar o comportamento atual e prever o comportamento futuro de um sistema, elaborar hipóteses e propor possíveis ajustes. Assim, acredita-se que a modelagem e simulação da radiação solar, bem como do circuito elétrico equivalente de um sistema fotovoltaico, contribuem significativamente na otimização de modelos e de desempenho de protótipos.

De acordo com os trabalhos supracitados, percebeu-se diferentes enfoques nas simulações abrangendo desde a radiação incidente nos geradores fotovoltaicos até a análise estrutural dos troncos e galhos. Entretanto, constatou-se que nenhuma pesquisa considerou a influência do tronco e galhos como um objeto causador de sombras, reduzindo a eficiência do sistema fotovoltaico.

Verificou-se, também, que não há um *software* específico direcionado ao projeto de árvore solar fotovoltaica e ao estudo do sombreamento nos geradores fotovoltaicos. Desta forma, observou-se que o programa utilizado por cada autor foi escolhido e adaptado de acordo com o objetivo específico de cada trabalho. Mas,

aparentemente nenhum deles era abrangente o suficiente para realizar todas as etapas do dimensionamento, como: a. quantidade de folhas necessárias; b. cálculos estruturais; c. simulação da radiação incidente, considerando as possíveis fontes de sombreamento; d. avaliação do funcionamento em função da existência ou não de dispositivo seguidor do ponto de máxima transferência de potência, entre outros.

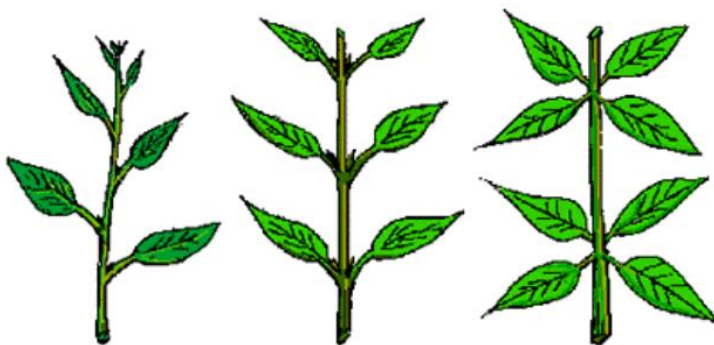
Seria interessante o desenvolvimento de um software que pudesse simular diferentes estruturas de sistemas fotovoltaicos, como árvores solares, incluindo análises de perda por áreas sombreadas, estimativa de radiação incidente em superfícies com diferentes orientações e geração de energia elétrica com base na eficiência dos equipamentos e dispositivos eletrônicos empregados e na configuração dos conjuntos de geradores fotovoltaicos conectados ao dispositivo seguidor do ponto de máxima transferência de potência.

2.4.2. Topologia

A topologia, considerada como a forma com que as folhas e galhos da árvore se dispõem, é um parâmetro fundamental para se alcançar um bom desempenho durante o processo de geração. É necessário analisar de forma criteriosa o melhor modelo de árvore a ser reproduzido. Dentro deste parâmetro, deve-se compreender como são constituídos os arranjos ou padrões das folhas nos caules. A esses arranjos, dá-se o nome de filotaxia.

Segundo Singh, Rawat e Srivastava (2019), as três filotaxias básicas encontradas nas plantas são: alternadas ou espiraladas, opostas e verticiladas, como ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Filotaxias básicas: alternadas ou espiraladas, opostas e verticiladas



Fonte: Singh, Rawat e Srivastava (2019).

No padrão alternado ou espiralado, as folhas nascem em nós distintos, podendo se nortear para diferentes sentidos. Na filotaxia oposta, as duas folhas nascem no mesmo nó do caule e se dispõem em sentidos opostos. Já na filotaxia verticilada, várias folhas surgem do mesmo nó e se dispõem em diferentes direções (GANGWAR et al., 2018).

Mais de 80% das espécies de plantas encontradas na natureza possuem a filotaxia alternada ou espiralada (SINGH; RAWAT; SRIVASTAVA, 2019). Essa filotaxia também foi muito utilizada nos projetos de árvores solares fotovoltaicas já desenvolvidos. À filotaxia espiralada, incorpora-se o padrão de Fibonacci para determinar o distanciamento angular entre as folhas subsequentes. Acredita-se que esse ângulo permita com que os geradores FV recebam energia solar em diferentes direções, aproveitando a luz solar ao longo do dia.

De acordo com Hyder, Sudhakar e Mamat (2018), o padrão de Fibonacci é decorrente da sequência descoberta pelo matemático italiano Leonardo Fibonacci em 1202, na qual cada número é a soma dos dois números precedentes. A sequência de Fibonacci, F , é descrita pelas Equações 2.4 – 2.6:

$$F = \{F_0, F_1, F_2, \dots\} \quad (2.4)$$

em que,

$$F_0 = 0, F_1 = 1 \quad (2.5)$$

$$F_k = F_{k-1} + F_{k-2} \quad (2.6)$$

para $k = 2, 3, 4, 5 \dots \infty$.

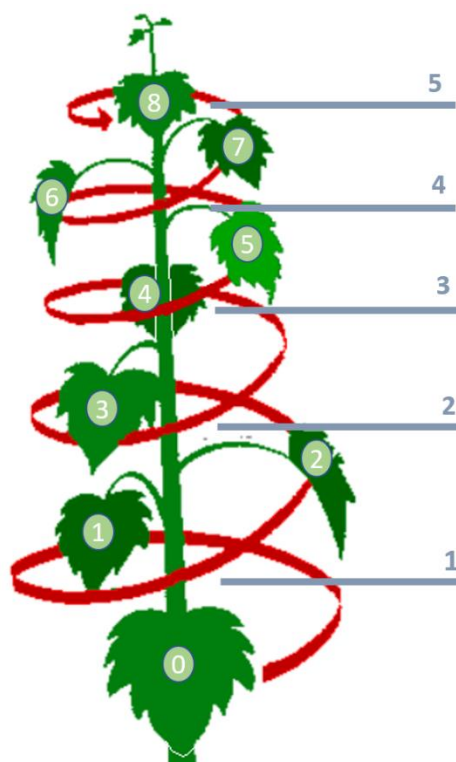
Desta forma, tem-se a sequência de Fibonacci, $F = \{0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, \dots\}$.

Para se determinar o distanciamento angular (d_{ang}) entre as folhas subsequentes (Equação 2.7), é necessário identificar o número de voltas necessárias (n_v) até a próxima folha se sobrepor à primeira, e o número de folhas (n_f) por período. Diversos estudos mostram que, na natureza, os valores mais frequentes de n_v e n_f são números presentes na sequência de Fibonacci (PINTO, 2018).

$$d_{ang} = \frac{n_v}{n_f} 360 \quad (2.7)$$

Um arranjo com folhas espiraladas utilizando o padrão de Fibonacci 5/8 é mostrado na Figura 2.4. Pode-se observar que são necessárias 5 voltas completas para que a nona folha sobreponha a primeira folha. Neste padrão, o distanciamento angular entre as folhas subsequentes é de 225° .

Figura 2.4 - Exemplo de planta com padrão de Fibonacci 5/8



Fonte: Mathsball (2020), adaptado.

Existem vários padrões $\frac{n_v}{n_f}$ de filotaxia, como: 1/3, 2/5, 3/8. Para projetar uma árvore solar, Khatoon e Khan (2017) se inspiraram na filotaxia espiralada com o padrão 2/5 encontrado em carvalhos. Os cinco galhos foram uniformemente distribuídos em duas revoluções ao redor do tronco, formando um espaçamento vertical e uma distância angular entre galhos subsequentes de 5 cm e 144° , respectivamente. Em cada galho foram alocados dois geradores fotovoltaicos. Apesar dos galhos respeitarem uma sequência de posicionamento, os geradores FV fixados neles não tinham uma orientação determinada baseada em um padrão específico. Acredita-se que o estudo da orientação dos geradores FV seja de importância para pesquisas futuras.

O comprimento dos galhos também seguiu a sequência de Fibonacci. O galho do topo foi projetado com um comprimento L , o segundo e mais abaixo, com comprimento $2L$, o terceiro, $3L$, o quarto, $5L$ e o último galho, situado na parte inferior da árvore, com comprimento $8L$ (KHATOON; KHAN, 2017). Esse modo de dimensionamento dos galhos pode originar em uma árvore solar com uma conformação semelhante às coníferas.

De modo análogo, Singh, Rawat e Srivastava (2019) também desenvolveram sua árvore se espelhando no padrão $2/5$ identificado em carvalhos. Diferentes comprimentos de galhos foram escolhidos para evitar que as sombras dos geradores FV superiores atinjam os inferiores. O gerador superior foi definido como o de referência e os outros quatro geradores FV foram defasados 144° um do outro, no sentido anti-horário.

Já Gangwar et al. (2018), além de projetarem uma árvore solar com padrão $2/5$, desenvolveram, também, uma com padrão $3/8$, formando um ângulo entre os galhos de 135° . Eles concluíram que a árvore solar construída com o padrão $3/8$ gerou mais energia em comparação com a de padrão $2/5$ e com o sistema fotovoltaico convencional com orientação fixa, sob as mesmas condições de radiação solar.

Srisai e Harnsoongnoen (2019) construíram uma árvore solar empregando o ângulo de $137,5^\circ$ (conhecido como ângulo áureo) entre os galhos e entre o tronco e os galhos. Ademais, com intuito de comparar, instalaram a mesma quantidade de células com inclinação fixa e constataram que a árvore obteve uma maior geração no decorrer do dia.

Já nas pesquisas de Duque et al. (2017) e Rodrigues et al. (2019), foram adotadas árvores com formatos semelhantes a uma palmeira, com filotaxia verticilada. Arranjos de três ou mais geradores fotovoltaicos eram fixados a um mesmo nó do tronco da árvore.

Outras topologias de árvores solares fotovoltaicas também foram estudadas. Nas pesquisas de Dey, Lakshmanan e Pesala (2018), Dey e Pesala (2020) e Dey, Lakshmanan e Pesala (2020), não aderiram a um padrão preestabelecido de topologia de árvore. Com as simulações e algoritmos desenvolvidos, eles determinaram o arranjo e posicionamento de cada gerador de modo a obter a maior geração de energia.

Observou-se que muitos trabalhos empregaram o padrão de Fibonacci com filotaxia alternada para o desenvolvimento das árvores solares. Dentre esses padrões,

os mais comuns foram o 2/5 e 3/8, com distanciamento angular entre folhas subsequentes de 144° e 135° , respectivamente. Notou-se, também, a utilização da filotaxia verticilada na topologia semelhante à palmeira. Por fim, a filotaxia oposta não foi aplicada em nenhum projeto. Acredita-se que, neste último caso, a disposição das células fotovoltaicas causaria muita perda por sombreamento se comparado com as demais filotaxias.

Constatou-se que, em alguns casos, a sequência de Fibonacci foi usada tanto na disposição angular dos galhos em relação ao tronco, como também para determinar o comprimento dos galhos, influenciando no dimensionamento da árvore solar como um todo. Na realidade, a otimização deve ainda considerar outros parâmetros geométricos como: altura da árvore, distância vertical entre galhos e dimensões das folhas.

2.4.3. Orientação dos geradores fotovoltaicos

O ângulo de incidência solar varia de acordo com a hora, dia do ano e localização geográfica. Segundo Dey, Lakshmanan e Pesala (2020), Chennai ($13,08^\circ$ N) e Bangalore ($12,96^\circ$ N), ambas cidades indianas, têm quase a mesma latitude, entretanto, os padrões de radiação solar para os dois locais são significativamente distintos. Variáveis como altitude local e índice de claridade do céu também influenciam neste resultado. Isso significa que, construir um sistema fotovoltaico com geradores FV de inclinação fixa baseado apenas na latitude local pode nem sempre ser a melhor opção.

Se espelhar em uma árvore para projetar um sistema fotovoltaico torna-se atrativo, pois, uma árvore natural é eficaz na absorção de luz solar devido à orientação diversificada de suas folhas para otimizar a captura de radiação solar. Consequentemente, nem todas as folhas terão ângulos de incidência ótimos nos mesmos instantes (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018).

Assim, a orientação dos geradores FV deverá ser determinada de acordo com o objetivo do sistema. Este, poderá exigir, por exemplo, uma melhor eficiência nos meses de verão, quando os índices de radiação são maiores, ou uma otimização da geração nos meses de inverno, com o intuito de uniformizar a geração ao longo do ano.

Alguns autores como Dey, Lakshmanan e Pesala (2020), Kishore et al. (2019) e Dey e Pesala (2020) determinaram os ângulos β e γ de cada gerador por meio de simulações. Os ângulos ótimos encontrados foram singulares para cada gerador e não necessariamente eram próximos ao valor da latitude onde o experimento foi realizado.

Gangwar et al. (2018) e Singh, Rawat e Srivastava (2019), que projetaram suas árvores solares na Índia, inclinaram apenas as células voltadas ao sul com ângulo igual a latitude local. As demais células tiveram outros valores de inclinação estipulados pelos autores. Uma segunda árvore solar também foi construída por Gangwar et al. (2018) e as células solares direcionadas para leste e oeste foram dispostas na horizontal, as voltadas ao sul, sudeste e sudoeste tiveram inclinação de 30° (sendo que a latitude onde o experimento foi realizado era de $29,02^\circ$ N) e as direcionadas para o norte, nordeste e noroeste foram inclinadas em -30° .

Acredita-se que otimizar os ângulos de inclinação das células solares é uma interessante alternativa para elevar a eficiência de sistemas fotovoltaicos. Entretanto, percebeu-se que esta não é uma tarefa fácil. É necessário se atentar para fatores como a localização em que se encontra e o direcionamento de cada célula para se estimar a melhor inclinação a ser utilizada.

Notou-se, ainda, a tendência em direcionar as células solares para o sul, quando se situado no hemisfério norte e, conseqüentemente, para o norte, quando localizado no hemisfério sul, além de inclinar os geradores fotovoltaicos com o ângulo igual a latitude local.

No mais, ressalta-se a necessidade de se realizar mais estudos de simulação. Recomenda-se que a validação da simulação ocorra por meio de experimentos práticos de forma a comprovar a orientação ótima real (ângulo de inclinação e de azimute) dos geradores fotovoltaicos.

2.4.4. Características construtivas

Durante a pesquisa, observou-se que alguns autores optaram por desenvolver árvores solares em tamanho real, conforme projetado, enquanto outros construíram protótipos em pequena escala.

Deep, Mishra e Agarwal (2020) construíram uma árvore em tamanho real em Nova Delhi, Índia (latitude 28° N). Eles utilizaram uma estrutura metálica e cinco

geradores FV de silício cristalino de 1 kWp, totalizando 5 kWp. Cada gerador possuía dimensões de 1,65 x 1,00 m.

Shanmukhi et al. (2019) e Dey e Pesala (2020) simularam árvores solares com potência de 3 kWp em escala real, com alturas variando entre 4 e 5 metros.

A árvore solar desenvolvida por Duque et al. (2017) em Medellín, Colômbia (latitude 6,22° N), com 3,5 m de altura, foi composta por quatro folhas de acrílico nas quais se apoiavam os quatro geradores fotovoltaicos, como pode ser observado na Figura 2.5. Cada gerador tinha dimensões de 54 x 83,2 cm e potência nominal de 50 Wp. O tronco da árvore foi feito com bambu e em sua base foi construído um assento octogonal de aço e madeira, que atendia também como suporte da estrutura.

Figura 2.5 - Projeto de árvore solar com tronco feito de bambu



Fonte: Duque et al. (2017).

Por sua vez, Kishore et al. (2019) implantaram uma árvore solar (Figura 2.6) com cinco geradores, em escala real, no Central Electronics Engineering Research Institute (CEERI), em Pilani, na Índia (latitude 28,37° N). A árvore solar foi projetada maximizando a geração de energia média ao longo do ano. Com ela, era possível alimentar o servidor local, a iluminação em LED's na entrada da instituição e os sensores conectados à árvore solar, que monitoravam a geração de energia e a qualidade do ar.

Figura 2.6 - Árvore solar no CEERI, Índia



Fonte: Kishore et al. (2019).

Já Rodrigues et al. (2019) projetaram uma árvore solar (Figura 2.7.a) de 1,5 kWp, no estado de São Paulo (latitude 23,5° S) e construíram um protótipo (Figura 2.7.b) nomeado por G.I.N.O® (Galho Interativo de Navegação Orientada) em escala 1:10. Durante os experimentos em dias chuvosos, os autores observaram uma maior instabilidade do G.I.N.O® na captação de energia quando comparado com um sistema fotovoltaico plano, entretanto, notaram que a eficiência de geração do G.I.N.O® ainda foi maior.

Figura 2.7 - (a) Modelo projetado do G.I.N.O®; (b) Protótipo construído



(a)

(b)

Fonte: Rodrigues et al. (2019).

Patil e Madiwal (2016) construíram um protótipo (Figura 2.8) em Kolhapur, Índia (latitude 16,76° N), no qual a parte inferior do tronco era fixa e a superior era móvel, podendo ter seu posicionamento regulado. Os geradores fotovoltaicos de 50 Wp cada foram alocados em suportes fixados à seção superior do tronco. Com este sistema, os geradores poderiam ser inclinados manualmente para um desejado de modo a obter a radiação solar máxima para um determinado período.

Figura 2.8 - Protótipo de árvore solar



Fonte: Patil e Madiwal (2016).

Com células fotovoltaicas de 3 Wp e dimensões de 18,5 x 18,5 cm, Gangwar et al. (2018) confeccionaram duas árvores solares distintas em Pantnagar, Índia (latitude 29,02° N). A primeira possuía um tronco de PVC com altura de 1,84 m. As oito células fotovoltaicas foram fixadas ao tronco por meio de galhos feitos de alumínio (Figura 2.9.a). A segunda árvore também possuía um tronco de PVC, porém com altura de 1,37 m e apenas seis células fotovoltaicas (Figura 2.9.b).

Figura 2.9 - Árvore solar (a) com 8 células solares; (b) com 6 células solares



(a)

(b)

Fonte: Gangwar et al. (2018).

Em seu protótipo, também construído em Pantnagar, na Índia, Singh, Rawat e Srivastava (2019) utilizaram um tronco feito de tubo de PVC com 1,52 m de altura e seis células fotovoltaicas de 3 Wp com dimensões de 20,0 x 20,0 cm cada, muito semelhante à segunda árvore de Gangwar et al. (2018), como mostrado na Figura 10. Os últimos dois trabalhos citados construíram um sistema com geradores FV fixos para meios de comparação. Esse sistema foi composto por seis células iguais às empregadas nas árvores solares, fixadas com inclinação igual à latitude local e orientadas ao sul (Figura 2.10). De maneira análoga, as duas pesquisas concluíram que as árvores solares conseguiram gerar mais energia do que o sistema comparado.

Figura 2.10 - Árvore solar e sistema tradicional com inclinação fixa, ambos com 6 células solares



Fonte: Singh, Rawat e Srivastava (2019).

Dey, Lakshmanan e Pesala (2018) desenvolveram um modelo de árvore solar em escala reduzida (Figura 2.11) para a cidade de Paris (latitude $48,82^\circ$ N). Foram empregadas cinco células solares de 15 cm^2 , feitas de silício monocristalino, com eficiência de 12%, posicionadas de acordo com as orientações otimizadas por meio da simulação multiobjetivo citada anteriormente. A estrutura da árvore foi fabricada usando uma impressora 3D.

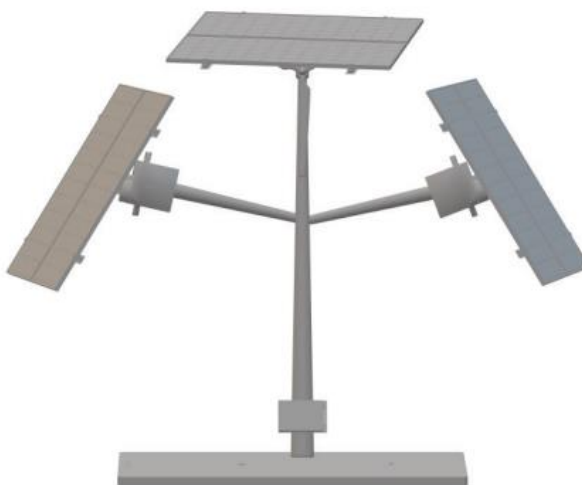
Figura 2.11 - Árvore solar em escala reduzida



Fonte: Dey, Lakshmanan e Pesala (2018).

Karmakar, Mallipeddi e Protiq (2020) construíram uma árvore fotovoltaica utilizando um tubo de alumínio de aproximadamente 1,22 m como tronco. O projeto era composto de três geradores fotovoltaicos com dimensões 12,5 x 9,8 cm cada. Um gerador foi fixado acima dos demais, na horizontal. Os outros dois geradores FV, móveis, foram dispostos nas laterais opostas, com o auxílio de duas hastes (galhos) de cerca de 30 cm cada, formando um eixo de simetria na árvore solar (Figura 2.12).

Figura 2.12 - Modelo de árvore solar



Fonte: Karmakar, Mallipeddi e Protiq (2020).

Por último, Oluwafemi, Laseinde e Salau (2019) definiram seu projeto como árvore solar, no entanto, eles a construíram com apenas um gerador de silício monocristalino de 100 Wp apoiado a uma estrutura metálica (Figura 2.13). O gerador foi disposto de modo que ele consiga se mover livremente para acompanhar o movimento do sol, de forma semelhante ao girassol.

Figura 2.13 - Árvore Solar com um único módulo FV



Fonte: Oluwafemi, Laseinde e Salau (2019).

Os trabalhos analisados utilizaram diferentes materiais para confeccionar as estruturas das árvores solares. Para as construções em escala real, observou-se uma predominância em material metálico, exceto um modelo, que escolheu o bambu devido às suas características econômicas, ambientais e físico-químicas.

Com relação a potência instalada, foram construídas árvores de 18 Wp a 5 kWp, variando de 1 até 12 geradores fotovoltaicos. Notou-se que um maior número de geradores FV proporciona maiores graus de liberdade e, portanto, maior flexibilidade para ajustar a curva de geração de energia. Entretanto, deve-se lembrar que, quanto maior o número de geradores FV, maiores são as chances de ocorrer perdas por sombreamento.

Contudo, notou-se uma dificuldade em realizar uma comparação direta entre os trabalhos analisados devido à falta de disponibilização de dados na descrição da construção das árvores solares, como a altura, distanciamento entre os geradores FV, quantidade e potências dos geradores fotovoltaicos utilizados, localização e condições

dos testes em si. Além disso, nem todos especificaram as características construtivas/tecnológicas dos geradores utilizados, nem as suas eficiências.

Aconselha-se para futuros protótipos de árvore solar fotovoltaica a utilização de troncos com diâmetros menores, com o intuito de gerar menos sombra nos geradores. Além disso, sugere-se a utilização de um maior número de células/módulos FV para poder comparar a redução da eficiência total do sistema FV com o aumento de células/módulos FV.

2.4.5. Rastreamento solar

Nas pesquisas de Oluwafemi, Laseinde e Salau (2019), Rodrigues et al. (2019), Karmakar, Mallipeddi e Protiq (2020) e Madhavan e Subash (2021) foram utilizados sistemas de rastreamento solar para posicionar os geradores fotovoltaicos e garantir que eles fossem expostos à máxima radiação solar.

Para o rastreamento solar, Oluwafemi, Laseinde e Salau (2019) empregaram dois sensores de luminosidade *LDR* (*Light Dependent Resistor*), um em cada extremidade do gerador FV, que enviavam os sinais medidos para um Arduino. Este, por meio de algoritmo, determinava a maior radiação solar e corrigia a posição dos módulos. A movimentação do gerador FV era realizada por meio de motor e atuador, representando um grau de liberdade (Figura 2.13). O projeto de Madhavan e Subash (2021) foi muito semelhante ao de Oluwafemi, Laseinde e Salau (2019). Entretanto, Madhavan e Subash (2021) implementaram um aspersor de água na extremidade do gerador, comandado pelo celular via *Bluetooth*, para realizar a limpeza do gerador.

Rodrigues et al. (2019) construíram seu protótipo como mostrado na Figura 2.6 e destinaram um sistema de reorientação para cada conjunto com três células fotovoltaicas. O movimento de rastreamento solar se dava por meio de três servomotores, conectados a cada uma das células, que as posicionavam de acordo com a leitura realizada pelos sensores *LDR*. Esses sensores foram colocados nas extremidades de cada célula fotovoltaica. Com este protótipo, Rodrigues et al. (2019) encontraram ganhos significativos quando comparados com sistemas fotovoltaicos de células planas, alcançando cerca de 21% de aumento na eficiência de captação de energia.

Karmakar, Mallipeddi e Protiq (2020) também empregaram *LDR's* para realizarem o rastreamento solar. Dois *LDR's* foram utilizados para cada gerador móvel

disposto nas laterais da árvore solar (Figura 2.12). O microcontrolador processava os dados recebidos pelos sensores e gerava os sinais para acionar os dois servomotores, dispostos cada um em um galho. Os autores concluíram que houve um ganho de 15% na eficiência da árvore solar com sistema de rastreamento quando comparado com a mesma árvore sem rastreamento solar e com todos os geradores FV fixos.

Os estudos supracitados não mencionaram o consumo de energia na alimentação dos motores empregados na movimentação dos eixos, nem mesmo reportaram a necessidade de uma manutenção periódica para o sistema de rastreamento. No entanto, sabe-se que é necessário parte da energia gerada para alimentar os equipamentos utilizados nesse tipo de sistema e que uma manutenção com maior frequência se torna indispensável. Assim, sugere-se uma avaliação aprimorada para verificar se a implementação de um sistema de rastreamento solar em uma árvore solar é vantajosa.

2.4.6. Área ocupada

O propósito de muitos trabalhos que abordam a árvore solar fotovoltaica é a redução de área ocupada para obter uma quantidade equivalente ou superior de geração de energia em relação a um sistema fotovoltaico com geradores FV fixos dispostos na horizontal.

Conforme Syafriyudin (2018), as instalações de sistemas fotovoltaicos tradicionais requerem uma grande área livre e sem sombreamento. Porém, a escassez desses terrenos podem ser um sério problema nas grandes cidades. Além disso, Renugadevi (2017) ressalta que a terra vem se tornando um bem muito caro para a sociedade devido ao alto crescimento populacional. Hyder, Sudhakar e Mamat (2018) analisaram que a instalação desses sistemas em telhados se tornou uma opção atraente, entretanto, essas coberturas podem possuir espaços limitados para a alocação dos geradores FV. Assim, Renugadevi (2017) constatou que a árvore solar é uma atraente alternativa de geração de energia, porque, em geral, requer um terreno menor quando comparado com o sistema fotovoltaico tradicional.

Alguns autores consideram que o espaço necessário para a instalação de uma árvore solar fotovoltaica seja apenas a área da base do seu tronco, não levando em consideração a área dos geradores FV (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018). Isso se dá pelo fato de que, embora a árvore solar ocupe uma área projetada maior do que

apenas a área da sua base, o espaço do solo abaixo de seus geradores FV ainda pode ser usado de forma alternativa.

Dessa forma, Renugadevi (2017) e Hyder, Sudhakar e Mamat (2018) relataram que, para gerar a mesma quantidade de energia de um sistema fotovoltaico tradicional, é necessária uma área consideravelmente menor (aproximadamente 1%) para a instalação de uma árvore solar.

Rodrigues et al. (2019) concluíram em sua pesquisa que a árvore solar proposta por eles reduzia a área de ocupação em 86,9%. Já Deep, Mishra e Agarwal (2020) afirmaram que a área total ocupada pelo sistema fotovoltaico tradicional foi 99,14% maior do que a área necessária para a árvore solar.

Outros autores como Dey, Lakshmanan e Pesala (2018) não consideraram apenas a área da base. Eles determinaram a área projetada de toda a árvore solar no terreno, incluindo os geradores FV e os espaços entre eles. Com isso, concluíram que a área ocupada pela árvore foi cerca de 2,7 vezes maior do que a ocupada pelos geradores FV com inclinação igual a latitude. Entretanto, ressaltaram que o espaço no solo não foi integralmente utilizado, podendo ser empregado para outros fins.

Acredita-se que as árvores fotovoltaicas, se otimizadas, podem vir a gerar mais do que sistemas fotovoltaicos planos de mesma área projetada. Porém, o custo associado a elas pode ser maior, devido à maior quantidade de geradores FV e à estrutura empregada.

Além disso, por mais que a área abaixo dos geradores FV possa ser utilizada para outros fins, considerar apenas a área da base do tronco para precisar a área ocupada pela árvore solar pode ser um equívoco. Seria complexo, por exemplo, instalar duas árvores próximas uma da outra considerando apenas as áreas da base do tronco sem que suas folhas/geradores fotovoltaicos se colidissem. Recomenda-se utilizar a área projetada dos geradores FV no solo ou até mesmo empregar o comprimento do maior galho como o raio de uma circunferência e calcular a área necessária para a instalação da árvore.

2.4.7. Uso múltiplo

Por último, o aspecto uso múltiplo da área foi revisado envolvendo a geração de energia fotovoltaica e outras atividades. A área abaixo dos geradores FV de uma árvore solar pode ser aproveitada para diversos fins, como produção agrícola, áreas

de lazer e estacionamentos sombreados. Pode-se, também, instalar geradores FV como uma usina flutuante em lagos e reservatórios, fazendo assim, um uso múltiplo do local.

A combinação da produção agrícola e da geração de energia elétrica por meio da tecnologia fotovoltaica, pode ser nomeada de sistema agrivoltaico. Basicamente, esses sistemas constituem-se de geradores fotovoltaicos posicionados a uma altura relativa acima do solo e espaçados em determinados intervalos. Esse distanciamento entre os geradores FV é dimensionado para permitir com que a luz solar necessária para a fotossíntese alcance as plantações (MAJUMDAR; PASQUALETTI, 2018; SEKIYAMA; NAGASHIMA, 2019). Há estudos que afirmam que estes sistemas agrivoltaicos são eficazes para culturas tolerantes à sombra como batata-doce, couve, inhame e rúcula (DINESH; PEARCE, 2016). No entanto, Sekiyama e Nagashima (2019) concluíram em sua pesquisa que um aumento na produtividade poderia ser alcançado até com culturas que requerem bastante luz solar, como o caso do milho.

Outro possível uso múltiplo é a instalação dessas árvores solares em estacionamentos a céu aberto. Figueiredo (2015) explica que os sistemas fotovoltaicos poderiam, além de fornecer sombreamento para os veículos, substituindo as coberturas tradicionais, gerar energia para carregar bicicletas e carros elétricos, de forma que o excedente possa ser utilizado para consumo nas instalações do estacionamento, como iluminação noturna, sistema de segurança, entre outros.

A instalação de usinas fotovoltaicas flutuantes em lagos e reservatórios também pode configurar um uso múltiplo. Uma usina fotovoltaica flutuante quando instalada em um reservatório de uma central geradora hidrelétrica pode complementar a geração hidrelétrica em períodos de seca, bem como melhorar a qualidade de energia (SILVÉRIO et al., 2018). Esse tipo de instalação flutuante proporciona alguns benefícios como: (i) refrigeração natural dos geradores FV, reduzindo a temperatura deles e, conseqüentemente, aumentando a eficiência do sistema; (ii) frequência de limpeza reduzida por estarem instalados em um ambiente com baixos índices de poeira; (iii) sombreamento do corpo d'água e redução da sua evaporação; (iv) aproveitamento da superfície inexplorada da água e economia de terras que podem ser destinadas a outros fins (SAHU; YADAV; SUDHAKAR, 2016).

Por fim, de acordo com Syafriyudin (2018), além do obstáculo relacionado aos requisitos de área, a tecnologia solar fotovoltaica enfrenta obstáculos relacionados à percepção pública, devido à ausência de uma estética agradável. Assim, o conceito

de árvore solar seria capaz de solucionar esses desafios de forma eficaz, podendo apresentar uma agradável estrutura arquitetônica.

2.5. Conclusão

A estratégia de se dispor os geradores fotovoltaicos em formato de uma árvore tem se mostrado uma interessante alternativa para situações em que a principal restrição venha a ser a área disponível e não o custo de instalação do sistema. Com a árvore solar consegue-se reduzir a área necessária para a instalação dos geradores FV, além de maximizar a radiação incidente neles e, conseqüentemente, aumentar a geração de energia elétrica. Todavia, notou-se que uma análise criteriosa dos parâmetros de projeto deve ser realizada para se obter uma árvore solar eficaz.

Constatou-se que muitos estudos têm reproduzido as topologias de árvores encontradas na natureza em árvores solares com o intuito de obter maior eficiência de captação de radiação solar. Verificou-se que a filotaxia mais empregada entre os projetos analisados foi a alternada ou espiralada, assim como ocorre na natureza. Além disso, percebeu-se que o padrão da sequência de Fibonacci foi utilizado na maioria dos casos para determinar o distanciamento angular entre as folhas/células solares, apesar de ainda não ser comprovado que esse padrão é o mais eficiente para a geração de energia elétrica.

Observou-se que a otimização dos ângulos de inclinação das células solares é fundamental para uma maior eficiência de sistemas fotovoltaicos. Essa otimização pode ser obtida por meio de modelagens e simulações do sistema fotovoltaico. Informações relacionadas a localização, como a latitude e altitude local, devem ser consideradas para as simulações, assim como os dados que dependem das diferentes épocas do ano, como o ângulo de altitude solar, o ângulo de zênite e o índice de claridade.

Os trabalhos analisados desenvolveram árvores solares de diferentes características, variando de 1 a 12 geradores FV e potência instalada entre 18 Wp a 5 kWp. Constatou-se que aumentando a quantidade de geradores FV consegue-se maiores graus de liberdade e, portanto, maior flexibilidade para ajustar a curva de geração de energia. Entretanto, destacou-se que as chances de ocorrer perdas por sombreamento são maiores com o aumento do número de geradores FV, assim é fundamental que sejam feitos estudos de otimização.

Apesar de existirem projetos de árvores solares que ocupam uma área maior, se comparado a uma instalação convencional, a maioria consegue reduzir o espaço ocupado, rearranjando o posicionamento dos geradores FV. Assim, torna-se possível uma maximização de geração de energia elétrica por área. Também, observou-se que pode haver um uso múltiplo do local onde a árvore solar é instalada, no qual o terreno abaixo dos geradores FV pode ser utilizado para outras finalidades.

Por fim, constata-se que o tema é promissor quanto ao potencial de aplicações que dependem de estética, uso múltiplo e otimização da geração fotovoltaica e da área ocupada. No entanto, ainda se sente a necessidade de pesquisas, quanto a: (i) Estudos sistemáticos englobando etapas de desenvolvimento de produto como: modelagem, simulação e validação de protótipos; (ii) Análise da geração de energia elétrica em função de parâmetros geométricos e elétricos das árvores, épocas do ano, de sistemas de controle e automação, e de tecnologias de geração fotovoltaica utilizadas; e (iii) Comparação efetiva de diferentes topologias de árvores solares.

2.6. Referências Bibliográficas

ALHAMROUNI, I.; RAHMAR, M. K.; ISMAIL, F. A.; SALEM, M.; JUSOH, A.; SUTIKNO, T. Design and development of SEPIC DC-DC boost converter for photovoltaic application. **International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)**, v. 10, n. 1, p. 406-416. 2019. Disponível em: <http://doi.org/10.11591/ijped.v10.i1.pp406-413>. Acesso em: 03 abr. 2021.

AWASTHI, A.; SHUKLA, A. K.; MANOHAR, M. S. R.; DONDARIYA, C.; SHUKLA, K. N.; PORWAL, D.; RICHHARIYA, G. Review on sun tracking technology in solar PV system. **Energy Reports**, n. 6, p. 392-405, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.004>. Acesso em: 10 mai. 2021.

DEEP, R.; MISHRA, A.; AGARWAL, A. Comparative analysis of solar panel output power: matrix vs tree form. **MATEC Web of Conferences**, n. 307, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030701002>. Acesso em: 08 abr. 2021.

DEY, S.; LAKSHMANAN, M. K.; PESALA, B. Optimal solar tree design for increased flexibility in seasonal energy. **Renewable Energy**, India, n. 125, p. 1038-1048, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.017>. Acesso em: 16 abr. 2021.

DEY, S.; LAKSHMANAN, M. K.; PESALA, B. Tuning the solar power generation curve by optimal design of solar tree orientations. **Advances in Energy Research**. India, v. 1, p. 461-469, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2666-4_45. Acesso em: 15 ago. 2021.

DEY, S.; PESALA, B. Solar tree design framework for maximized power generation with minimized structural cost. **Renewable Energy**, p. 1-30, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.035>. Acesso em: 16 abr. 2021.

DINESH, H.; PEARCE, J. M. The potential of agrivoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 54, p. 299-308, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>. Acesso em: 20 abr. 2021.

DUPONT, E.; KOPPELAAR, R.; JEANMART, H. Global available solar energy under physical and energy return on. **Applied Energy**, n. 257, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113968>. Acesso em: 12 abr. 2021.

DUQUE, E.; ISAZA, A.; ORTIZ, P.; CHICA, S.; LUJAN, A. Urban Sets Innovation: Design of a solar tree PV system for charging mobile devices in Medellín - Colombia. 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. p. 495-498, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191109>. Acesso em: 10 abr. 2021.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; SANTOS, G. R.; ARAÚJO, C. H. C. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 181-191, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>. Acesso em: 12 abr. 2021.

FIGUEIREDO, R. V. P. **Potencial solar de parques de estacionamento para carregamento de veículos elétricos**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa. Portugal, p. 99. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/20289?locale=en>. Acesso em: 10 abr. 2021.

GANGWAR, P.; SINGH, R.; TRIPATHI, R. P.; SINGH, A. K. Effective solar power harnessing using a few novel solar tree designs and their performance assessment. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental**. p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549162>. Acesso em: 03 mar. 2021.

GANGWAR, P.; KUMAR, N. M.; SINGH, A. K.; JAYAKUMAR, A.; MATHEW, M. Solar photovoltaic tree and its end-of-life management using thermal and chemical treatments for material recovery. **Case Studies in Thermal Engineering**, n. 14, p. 1-8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100474>. Acesso em: 12 abr. 2021.

GUPTA, S. Quantum solar tree-design and production for domestic applications and future trends. **International Journal of Applied Research**, v. 3, p. 439-444, 2017. Disponível em: <https://www.allresearchjournal.com/archives/?year=2017&vol=3&issue=3&part=G&ArticleId=3400>. Acesso em: 22 ago. 2021.

HYDER, F.; SUDHAKAR, K.; MAMAT, R. Solar PV tree design: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1079-1096, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.025>. Acesso em: 06 dez. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Data and statistics – Energy consumption. IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector>. Acesso em: 18 de outubro de 2020.

KARMAKAR, B.; MALLIPEDDI, R.; PROTIQ, M. N. K. Economical photovoltaic tree with improved angle of movement based sun tracking system. **Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems**, v. 13, p. 47-51, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14313/JAMRIS/4-2019/37>. Acesso em: 16 abr. 2021.

KHATOON, S.; KHAN, H. Comparative study of Fibonacci pattern and conventional pattern of solar cell. 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA). p. 158-163. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CERA.2017.8343319>. Acesso em: 12 abr. 2021.

KISHORE, K.; PESALA, B.; SANTOSH, M.; BOSE, S. C.; AKBAR, S. A. IoT platform to augment solar tree as smart highway street light with ambient monitoring capability. IEEE - 45670. 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies. p. 1-6. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICCCNT45670.2019.8944430>. Acesso em: 10 abr. 2021.

LI, K.; HAQUE, S.; MARTINS, A.; FORTUNATO, E.; MARTINS, R.; MENDES, M. J.; SCHUSTER, C. S. Light trapping in solar cells: simple design rules to maximize absorption. **Optica**, v. 7, n. 10, p. 1377-1384, Oct 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.394885>. Acesso em: 18 mar. 2021.

MAJUMDAR, D.; PASQUALETTI, M. J. Dual use of agricultural land: Introducing 'agrivoltaics' in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. **Landscape and Urban Planning**, v. 170, p. 150-168, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.011>. Acesso em: 22 mai. 2021.

MADHAVAN, N.; SUBASH, T. D. Advanced solar tree with sun tracking and cleaning technology. **Materials Today: Proceedings**. p. 1-3. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.320>. Acesso em: 20 out. 2021.

MATHSBALL. Fibonacci also plays football. Disponível em: <http://mathsball.blogspot.com/2014/01/fibonacci-also-plays-football.html>. Acesso em: 12 dez. 2020.

NAYAK, P.K., MAHESH, S., SNAITH, H.J., CAHEN, D. Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art. **Nature Reviews Materials**, 269–285, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0097-0>. Acesso em: 20 mai. 2021.

OLUWAFEMI, I.; LASEINDE, T.; SALAU, A. O. Design and construction of a 0.5 kW solar tree for powering farm settlements. **International Journal of Mechanical**

Engineering and Technology (IJMET), v. 10, n. 06, p. 19-33. 2019. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3451085. Acesso em: 23 mar. 2021.

PATEL, N.; GUPTA, N.; BABU, B. C. Design, development, and implementation of grid-connected solar photovoltaic power conversion system. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, p. 1-20. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1668506>. Acesso em: 12 mar. 2021.

PATIL, D. M.; MADIWAL, S. R. Design and development of solar tree for domestic applications. **International Journal of Engineering Sciences & Research Technology**, p. 102-111, August 2016. Disponível em: <http://www.ijesrt.com/issues%20pdf%20file/Archive-2016/August-2016/11.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2021.

PINTO, A. C. V. **Desenvolvimento de um protótipo de árvore fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/22199>. Acesso em: 06 out. 2021.

RACHARLA, S.; RAJAN, K. Solar Tracking System - A review. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 10, p. 72-81. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1267816>. Acesso em: 10 abr. 2021.

RAD, M. A. V.; TOOPSHEKAN, A.; RAHDAN, P.; KASAEIAN, A.; MAHIAN, O. A comprehensive study of techno-economic and environmental features of different solar tracking systems for residential photovoltaic installations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 129, p. 1-20. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109923>. Acesso em: 12 mar. 2021.

RENUGADEVI, V. An approach to solar power tree. **International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering**, p. 1-3, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICEICE.2017.8191921>. Acesso em: 10 abr. 2021.

RODRIGUES, H. H.; SPAGNOLO, R.; SILVA, G. M.; JUNIOR, J. B. Automação de árvores solares. **Brazilian Journal of Development**, Brasil, v. 5, n. 10, p. 17628-17639, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n10-035>. Acesso em: 16 set. 2021.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 74, p. 590-601. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>. Acesso em: 27 abr. 2021.

SAHU, A.; YADAV, N.; SUDHAKAR, K. Floating photovoltaic power plant: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 66, p. 815–824. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>. Acesso em: 14 mai. 2021.

SEKIYAMA, T.; NAGASHIMA, A. Solar sharing for both food and clean energy production: Performance of agrivoltaic systems for corn, a typical shade-intolerant

crop. **Environments**, v. 6, n. 65, p. 1-12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environments6060065>. Acesso em: 19 abr. 2021.

SHANMUKHI, K.; KUMAR, J. R.; PRASAD, N. V. S. S. S.; NAIDU, M. K.; RAO, S. S. Design and analysis on structure of a solar tree for 3 kW capacity. **Recent Advances in Material Sciences**. India: Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. Cap. 60, p. 747-757. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-13-7643-6_60. Acesso em: 14 mai. 2021.

SILVÉRIO, N. M.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; REDÓN-SANTAFÉ, M.; SANTOS, I. F. S.; VALÉRIO, V. E. M. Use of floating PV plants for coordinated operation with hydropower plants: Case study of the hydroelectric plants of the São Francisco River basin. **Energy Conversion and Management**, v. 171, p. 339-349. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.095>. Acesso em: 19 abr. 2021.

SINGH, R.; RAWAT, N.; SRIVASTAVA, R. Performance evaluation of a solar tree design and a fixed solar panel for effective solar power harnessing. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 14, n. 11, p. 2616-2621, 2019. Disponível em: https://www.ripublication.com/ijaer19/ijaerv14n11_13.pdf. Acesso em: 03 mai. 2021.

SRISAI, S.; HARNSOONGNOEN, S. Efficiency of solar tree based on golden ratio. **Journal os Physics: Conference Series**, n. 1380, p. 1-4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012025>. Acesso em: 09 abr. 2021.

SUN, X.; CHAVALI, R. V. K.; ALAM, M. A. Real-time monitoring and diagnosis of photovoltaic system degradation only using maximum power point—the Suns-Vmp method. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, p. 1-12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pip.3043>. Acesso em: 10 mai. 2021.

SYAFRIYUDIN. Characteristic solar tree construction on solar panel power plant. **Atlantis Highlights in Engineering (AHE)**, International Conference on Science and Technology (ICST 2018). v. 1, p. 515-521, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2991/icst-18.2018.108>. Acesso em: 17 jun. 2021.

YU, H.; MA, R.; XIAO, Y.; ZHANG, J.; LIU, T.; LUO, Z.; CHEN, Y.; BAI, F.; LU, X.; YAN, H.; LIN, H. Improved organic solar cell efficiency based on regulation of alkyl chain on chlorinated non-fullerene acceptors. **Materials Chemistry Frontiers**, p. 1-23. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0QM00151A>. Acesso em: 11 abr. 2021.

3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM DIFERENTES MODELOS DE ÁRVORE SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1. Resumo

A determinação do posicionamento ideal de um gerador fotovoltaico é fundamental para se obter a maximização de radiação incidente no mesmo. A orientação de cada gerador fotovoltaico pode ser definida a partir dos ângulos de inclinação e de azimute. Neste estudo foi realizada a modelagem da radiação solar incidente em superfícies inclinadas, de modo a determinar a melhor orientação de cada célula fotovoltaica que, em analogia às folhas, constitui uma árvore solar fotovoltaica. Acredita-se que com a árvore solar fotovoltaica pode-se aumentar o ganho de radiação solar por área ocupada em relação a um sistema fotovoltaico tradicional plano e fixo, além de poder gerar aproveitamentos múltiplos de área como, por exemplo, geração de energia elétrica e produção agrícola. Foram empregados dois modelos básicos de árvore, sendo eles: a espiralada, no qual as folhas são dispostas no tronco formando uma espiral, com distanciamento angular fixo de $137,5^\circ$ entre folhas subsequentes; e a conífera, em que o comprimento dos galhos aumenta a cada camada da árvore, tornando o diâmetro da camada da base maior que o da camada superior. O sombreamento gerado entre células fotovoltaicas foi considerado em ambos os modelos. As simulações foram realizadas para três cidades brasileiras com diferentes latitudes, sendo elas Viçosa – MG, Boa Vista – RR e Chuí – RS. Observou-se que o modelo de árvore solar espiralada tende a ser melhor quando o objetivo é maximizar o ganho de radiação solar por área, enquanto a conífera se destacou por apresentar menores perdas de radiação solar por sombreamento. As árvores solares fotovoltaicas estudadas para a cidade de Boa Vista – RR apresentaram as maiores perdas de radiação solar devido ao sombreamento entre células fotovoltaicas.

Palavras-chave: espiralada, conífera, sombreamento, área ocupada, energia.

3.2. Introdução

A utilização de módulos fotovoltaicos para a captação de energia solar e geração de energia elétrica vem sendo popularizada mundialmente. Uma variável que

influencia diretamente no desempenho desses geradores é a radiação solar incidente neles (JAIN; LALWANI, 2017). A maximização da radiação solar que incide em um módulo fotovoltaico está relacionada com a determinação de seu posicionamento ótimo. Este, por sua vez, pode ser determinado por meio de modelagens matemáticas a fim de identificar os ângulos ótimos de inclinação ($\beta_{\text{ótimo}}$) e de azimute ($\gamma_{\text{ótimo}}$) do gerador fotovoltaico (GARDASHOV et al., 2020).

O posicionamento ótimo pode variar de acordo com alguns parâmetros como latitude (ϕ), altitude (h), período de uso do sistema, clima e outros fatores atmosféricos como poeira e poluição (XU et al., 2017). Diversos estudos se dedicam à solução deste problema para diferentes localizações do mundo, com condições meteorológicas e ambientais distintas (HAFEZ et al., 2017; CHEN et al., 2018; GARDASHOV et al., 2020).

Kallioglu et al. (2019) desenvolveram um estudo para otimizar a radiação incidente de um gerador fotovoltaico considerando um período mensal, sazonal e anual. O ângulo de inclinação (β) foi analisado em um intervalo de 0° a 90° , com incrementos de 1° , até se obter o valor ideal para três cidades da Turquia, sendo elas e suas respectivas latitudes: Antalya ($36,88^\circ$ N), Kayseri ($38,72^\circ$ N) e Trabzon ($41,00^\circ$ N). Por se localizarem no hemisfério norte, o ângulo de azimute (γ) definido para as três cidades foi de 0° , ou seja, a superfície do gerador estaria direcionada para o sul geográfico. Quando empregado um $\beta_{\text{ótimo}}$ mensal, os autores obtiveram um aumento médio de radiação incidente de aproximadamente 15,85% para cada uma das três cidades avaliadas, quando comparado com um sistema fixo na horizontal. Ao analisarem diferentes $\beta_{\text{ótimo}}$ para cada estação do ano, Kallioglu et al. (2019) encontraram um ganho médio de cerca de 14,64%. Além disso, os autores determinaram que o $\beta_{\text{ótimo}}$ para as localidades avaliadas poderia ser definido como $|\phi|+17^\circ$, para o período de inverno; $|\phi|-18^\circ$, para a primavera; $|\phi|-34^\circ$, para o verão; e $|\phi|+7^\circ$ para o outono. Por fim, determinaram que o $\beta_{\text{ótimo}}$ médio para as localidades estudadas considerando o período de um ano foi em torno de $|\phi|-7^\circ$, e que o ganho médio seria de aproximadamente 9,69%.

Um modelo matemático foi utilizado por Abdallah et al. (2020), na Palestina, para estimar o ângulo de inclinação ideal e a radiação solar em uma superfície voltada para o sul ($\gamma = 0^\circ$), considerando diferentes períodos de análise. Quando comparados com uma superfície horizontal fixa, os autores identificaram um ganho de radiação de

aproximadamente 17%, 15%, 15% e 10% para ajustes mensais, semestrais, sazonais e anuais, respectivamente, dos ângulos de inclinação dos geradores fotovoltaicos. O ângulo de inclinação ótimo anual para a maioria das cidades palestinas foi de aproximadamente 29°, sendo cerca de $|\phi|-3^\circ$ para os locais estudados.

Kim, Han e Lee (2020) analisaram 22 módulos fotovoltaicos na cidade de Daegu (latitude 35,87°), na Coreia do Sul. Os autores utilizaram os dados de geração dos módulos, os dados meteorológicos e os dados de posição do sol para estimar a energia gerada por cada módulo na sua orientação otimizada. Em comparação com os ângulos de inclinação fixos iniciais, que já se encontravam no intervalo de 15° a 30°, os $\beta_{\text{ótimo}}$ anuais obtiveram um aumento médio de 0,83% na geração de energia, chegando até 4% para alguns geradores específicos. Isto ocorreu porque alguns ângulos iniciais já eram próximos ao ângulo ideal calculado. Quando o ângulo ótimo foi determinado e ajustado mensalmente, a geração de energia teve um aumento médio de aproximadamente 3,32% em relação aos ângulos iniciais. A variação de desempenho de cada módulo fotovoltaico para essa situação variou de 1,89% a 6,32%.

Ullah et al. (2019) determinaram o ângulo de inclinação ideal de um gerador fotovoltaico para a cidade de Lahore, no Paquistão, com latitude de 31,5° N. Os autores desenvolveram um código no MATLAB® utilizando dados de radiação solar de 17 anos do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). O algoritmo variou o ângulo β no intervalo de -90° a 90°, com incrementos de 0,5°, até obter a máxima radiação solar em um período predeterminado. Os autores constataram que com alterações de β diária, mensal, sazonal ou semestral resultaram em ganhos de radiação solar coletada de 7,41%, 7,25%, 6,09% e 5,90% ao ano, respectivamente, em relação ao ângulo de inclinação fixo igual a latitude. Por fim, o modelo foi validado com testes experimentais.

Também com o objetivo de determinar o ângulo de inclinação ótimo de geradores fotovoltaicos, Martín et al. (2020) desenvolveram um modelo em função de variáveis locais como latitude, fração da radiação difusa e albedo. Os autores concluíram que há uma perda média de energia de 1% para uma variação de 10° do ângulo de inclinação ótimo. No entanto, os mesmos autores indicaram que para uma variação de 40°, essa perda de energia pode chegar a 18% para localidades com latitudes mais baixas e 12% para latitudes mais altas.

Dey e Pesala (2020) estudaram a maximização anual da geração de energia elétrica de uma árvore solar, minimizando a quantidade necessária de material para a sua estrutura. Para isso, eles utilizaram dados reais de radiação solar para orientar os geradores solares de forma otimizada. Os autores implementaram uma otimização multiobjetivo baseada em algoritmos genéticos para posicionar os geradores de maneira que, tanto as perdas por sombreamento quanto a área projetada no solo fossem minimizadas. Dey e Pesala (2020) determinaram um equilíbrio entre esses dois fatores e encontraram uma perda anual por sombreamento de 0,17% para uma área normalizada no solo (fração da área dos módulos projetada no solo por área total dos módulos) de 1,67. Ou seja, a árvore solar desenvolvida pelos autores ocuparia uma área maior do que se todos os módulos estivessem dispostos um ao lado do outro na horizontal.

Pesquisas têm sido desenvolvidas com o propósito de determinar o posicionamento ideal de geradores solares e, conseqüentemente, otimizar a geração de energia elétrica. Entretanto, ainda existem poucos estudos direcionados à otimização da orientação de geradores em árvores solares fotovoltaicas, principalmente quando se trata de analisar as perdas por sombreamento entre os geradores e até mesmo por outros obstáculos. Ademais, não se conhecem rotinas que visem a maximização da absorção de energia por unidade de área em contraposição a outros algoritmos que visam a minimização do custo de geração por unidade de energia.

Com base no exposto, o objetivo dessa pesquisa foi de estimar, por meio de modelagem e simulação, o melhor posicionamento das células fotovoltaicas que constituem uma árvore solar. Visou-se determinar os ângulos de azimute e de inclinação para cada uma das células fotovoltaicas de modo a reduzir as perdas por sombreamento entre células e maximizar a radiação incidente anual por área ocupada.

Compõem os objetivos específicos: (i) Modelar árvores solares fotovoltaicas para dois modelos de arranjo de folhas e a radiação solar incidente nelas; e (ii) Simular os modelos de árvores solares fotovoltaicas quanto à radiação anual incidente, considerando diferentes latitudes e número de folhas, e comparar com o comportamento de um sistema fotovoltaico com inclinação fixa igual à latitude do local e igual à inclinação fixa otimizada do local.

3.3. Material e métodos

3.3.1. Modelagem da radiação solar incidente em árvores solares fotovoltaicas

A modelagem foi feita para: (i) radiação solar em superfície inclinada; (ii) árvores fotovoltaicas; e (iii) sombreamento entre folhas.

A modelagem da radiação solar em superfície inclinada foi a base para os cálculos da radiação solar incidente no conjunto das folhas, no qual cada folha foi constituída por uma célula fotovoltaica (FV).

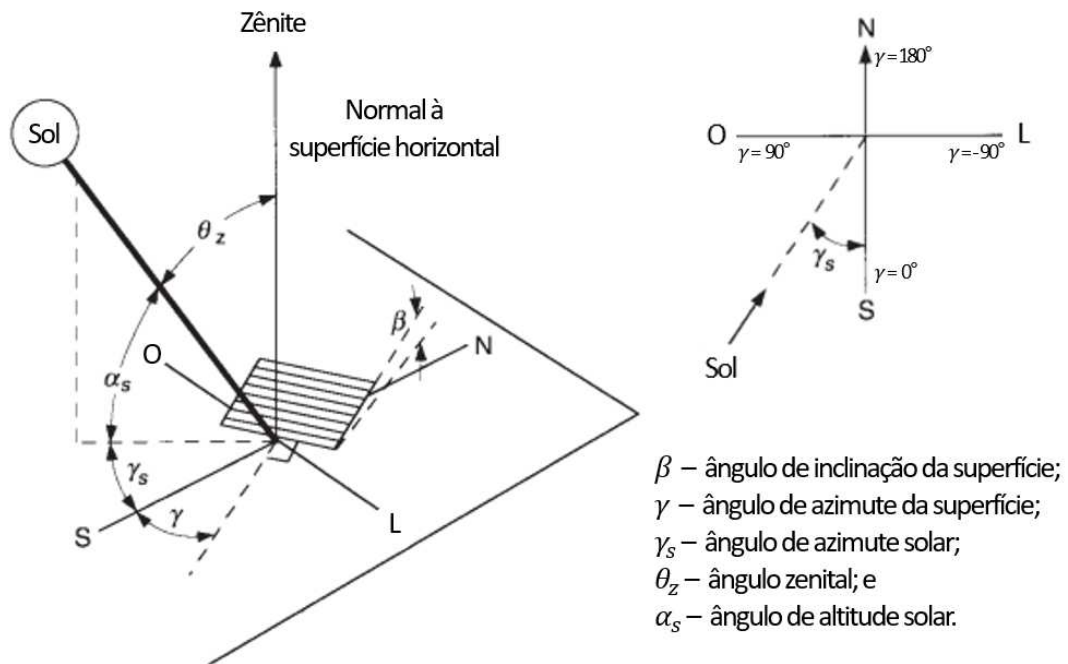
Foram empregados dois modelos de árvores, escolhidos a partir da observação de modelos encontrados na natureza. O modelo 1 (M1) possui todas as folhas ligadas diretamente ao tronco, com filotaxia espiralada, seguindo o padrão de distanciamento angular entre folhas de acordo com a sequência de Fibonacci. Já o modelo 2 (M2) possui a forma geométrica de uma conífera, onde o comprimento dos galhos aumenta a cada camada da árvore, tornando o diâmetro da camada da base maior que o da camada superior.

Por último, foram modelados os possíveis eclipses, isto é, o sombreamento entre folhas para cada um dos modelos de árvores estudados.

Modelagem da radiação solar em superfície inclinada

A orientação de cada célula FV foi definida a partir de dois ângulos, sendo eles: o ângulo de inclinação β , formado entre o plano horizontal e a superfície da célula; e o ângulo de azimute γ , correspondido pelo ângulo horizontal de orientação da célula, sendo considerado 0° quando a célula FV está voltada para o sul e 180° quando orientada para o norte geográfico. Valores negativos de γ simbolizam uma superfície tendendo a leste, enquanto os valores positivos de γ tendem a oeste (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2020; DUFFIE; BECKMAN, 2020). Os principais ângulos utilizados na modelagem estão ilustrados na Figura 3.1.

Figura 3.1 - Ângulos da modelagem de radiação solar em uma superfície inclinada



Fonte: Duffie e Beckman (2020), adaptado.

O ângulo horário (ω) representa o deslocamento angular do sol a leste ou a oeste do meridiano local devido à rotação da Terra. Durante o meio-dia, $\omega = 0^\circ$, e esse valor é acrescido de 15° por hora, sendo positivo para a tarde e negativo para a manhã. O ângulo horário do pôr do sol, ω_s , foi calculado de acordo com Duffie e Beckman (2020), como mostrado na Equação 3.1,

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.1)$$

em que,

ϕ – latitude ($^\circ$); e

δ – declinação solar ($^\circ$).

Para determinar a declinação solar, δ , que representa o ângulo formado entre o plano equatorial terrestre e a linha imaginária que conecta o centro da terra com o centro do sol (projeção dos raios solares), inicialmente foi calculada a variável auxiliar B conforme a Equação 3.2 (DUFFIE e BECKMAN, 2020),

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3.2)$$

em que,

n – n-ésimo dia do ano.

Assim, δ foi determinada de acordo com a Equação 3.3,

$$\begin{aligned} \delta = \frac{180}{\pi} & (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \operatorname{sen} B \\ & - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \operatorname{sen} 2B \\ & - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \operatorname{sen} 3B) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Por sua vez, os ângulos que determinam a posição do sol na abóboda celeste foram calculados conforme as Equações 3.4, 3.5 e 3.6. O ângulo zenital (θ_z) é o ângulo formado entre o eixo vertical do local (zênite) e a projeção dos raios solares. Já o ângulo de altitude solar (α_s) é o ângulo formado entre o eixo horizontal e a linha do sol, ou seja, é o ângulo complementar de θ_z . Por fim, o ângulo de azimute solar (γ_s) que é formado entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e o eixo sul (OLIVEIRA JUNIOR, 2015; DUFFIE; BECKMAN, 2020).

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta) \quad (3.4)$$

$$\alpha_s = 90 - \theta_z \quad (3.5)$$

$$\gamma_s = \operatorname{sinal}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \operatorname{sen} \phi - \operatorname{sen} \delta}{\operatorname{sen} \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (3.6)$$

A radiação solar horária que incide em um plano horizontal fora da atmosfera, isto é, a radiação extraterrestre horária, I_o , foi calculada de acordo com a Equação 3.7. Dada em J/m^2 , I_o compreendeu o valor de radiação extraterrestre durante um intervalo de tempo que ocorre entre os ângulos horários ω_1 e ω_2 , em que $\omega_2 > \omega_1$ (DUFFIE; BECKMAN, 2020),

$$\begin{aligned} I_o = \frac{12 \times 3600 G_{sc}}{\pi} & \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left[\cos \phi \cos \delta (\operatorname{sen} \omega_2 \right. \\ & \left. - \operatorname{sen} \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

em que,

G_{sc} - constante solar, 1367 W/m².

Já a radiação extraterrestre horária de incidência no plano normal aos raios solares, I_{on} , dada em J/m², foi calculada pela Equação 3.8 (SPENCER, 1971; IQBAL, 1983),

$$I_{on} = 3600 G_{sc}(1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \operatorname{sen} B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \operatorname{sen} 2B) \quad (3.8)$$

A partir dos dados de radiação solar diária H para uma determinada localidade, foi possível determinar a radiação solar horária I , como sugerido por Duffie e Beckman (2020) na Equação 3.9,

$$I = H r_t \quad (3.9)$$

em que,

r_t – razão da radiação solar horária e a radiação solar diária, adimensional.

De acordo com Collares-Pereira e Rabl (1979), r_t pôde ser determinada pela Equação 3.10,

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\operatorname{sen} \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (3.10)$$

No qual os coeficientes a e b são valores adimensionais definidos em função do ângulo horário do pôr do sol, como mostram as Equações 3.11 e 3.12 (COLLARES-PEREIRA; RABL, 1979),

$$a = 0,409 + 0,5016 \operatorname{sen}(\omega_s - 60) \quad (3.11)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \operatorname{sen}(\omega_s - 60) \quad (3.12)$$

O índice de claridade horário k_T , adimensional, definido por Duffie e Beckman (2020) como a razão entre a radiação horária incidente em uma superfície horizontal e a radiação horária extraterrestre, foi determinado como mostrado na Equação 3.13,

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (3.13)$$

Com os índices de claridade horários calculados pela Equação 3.13 foi possível determinar a componente difusa da radiação solar horária, I_d , em uma superfície horizontal, de acordo com a Equação 3.14 (ERBS; KLEIN; DUFFIE, 1982),

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09 k_T & \text{para } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 k_T + 4,388 k_T^2 \\ \quad - 16,638 k_T^3 + 12,336 k_T^4 & \text{para } 0,22 < k_T \leq 0,8 \\ 0,165 & \text{para } k_T > 0,8 \end{cases} \quad (3.14)$$

Assim, também pôde-se obter a radiação horária direta (I_b) em uma superfície horizontal subtraindo-se I_d de I (OLIVEIRA JR., 2015). Para identificar a radiação horária direta em uma superfície de inclinação β utilizou-se o fator geométrico R_b , adimensional, que foi determinado por meio da Equação 3.15 (DUFFIE e BECKMAN, 2020),

$$R_b = \frac{a_1}{a_2} \quad (3.15)$$

em que a_1 e a_2 foram calculados de acordo com as Equações 3.16 e 3.17,

$$\begin{aligned} a_1 = & (\text{sen } \delta \text{ sen } \phi \text{ cos } \beta - \text{sen } \delta \text{ cos } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma) \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi \\ & + (\text{cos } \delta \text{ cos } \phi \text{ cos } \beta + \text{cos } \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \text{ cos } \gamma) (\text{sen } \omega_2 \\ & - \text{sen } \omega_1) - (\text{cos } \delta \text{ sen } \beta \text{ sen } \gamma) (\text{cos } \omega_2 - \text{cos } \omega_1) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$a_2 = (\text{cos } \phi \text{ cos } \delta) (\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1) + (\text{sen } \phi \text{ sen } \delta) \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi \quad (3.17)$$

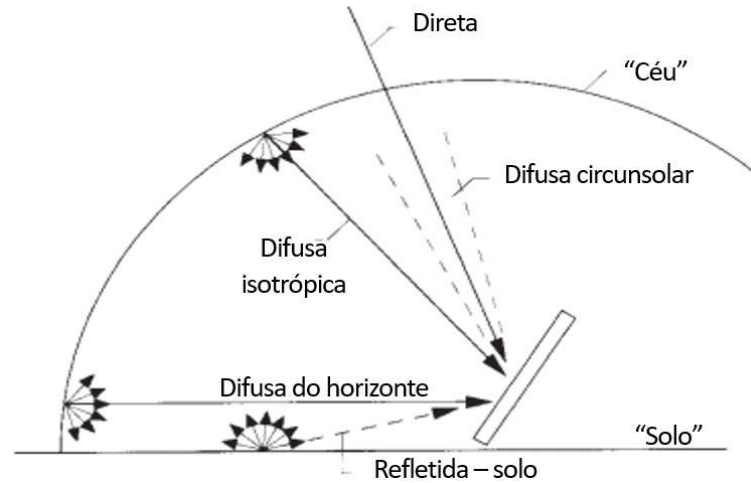
Então, a componente referente à radiação horária direta em uma superfície inclinada, $I_{b,inc}$, foi determinada como mostrado na Equação 3.18,

$$I_{b,inc} = I_b R_b \quad (3.18)$$

A radiação solar total que incide em uma superfície corresponde ao somatório de três componentes de radiação, sendo: radiação direta, radiação difusa e radiação refletida. Neste trabalho, para determinar a radiação solar total, foi considerado o modelo anisotrópico desenvolvido por Perez et al. (1990). Esse modelo subdivide a

radiação difusa em outras três componentes: difusa isotrópica, difusa circunsolar e difusa do horizonte, como mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Radiação direta, difusa e refletida em uma superfície inclinada



Fonte: Duffie e Beckman (2020).

Desta forma, a radiação difusa em uma superfície inclinada ($I_{d,inc}$) foi determinada conforme o modelo proposto por Perez et al. (1990), mostrado pela Equação 3.19,

$$I_{d,inc} = I_d \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{c_1}{c_2} + F_2 \sin \beta \right] \quad (3.19)$$

em que F_1 e F_2 são coeficientes de brilho circunsolar e de horizonte. Os termos c_1 e c_2 são relacionados aos ângulos de incidência do cone de radiação circunsolar, de acordo com as Equações 3.20 e 3.21 (PEREZ et al., 1990),

$$c_1 = \max(0, \cos \theta) \quad (3.20)$$

$$c_2 = \max(\cos 85, \cos \theta_z) \quad (3.21)$$

Para calcular os valores de F_1 e F_2 foi necessário, primeiro, determinar os parâmetros que descrevem as condições do céu, sendo eles: ângulo zenital (θ_z), claridade (ε) e brilho (Δ).

O parâmetro ε foi calculado de acordo com a Equação 3.22 (PEREZ et al., 1988),

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_{b,n}}{I_d} + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5,535 \times 10^{-6} \theta_z^3} \quad (3.22)$$

em que $I_{b,n}$ é a radiação horária direta sobre uma superfície normal aos raios solares, em J/m^2 , dada pela Equação 3.23 (DUFFIE; BECKMAN, 2020):

$$I_{b,n} = \frac{I_b}{\cos \theta_z} \quad (3.23)$$

E o parâmetro Δ é dado pela Equação 3.24 (PEREZ et al., 1988),

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{on}} \quad (3.24)$$

em que m é a razão da massa de ar atmosférico que a radiação solar direta atravessa sobre a massa que iria atravessar caso o sol estivesse no zênite. A Equação 3.25 exibe como m foi calculada, de acordo com Kasten e Young (1989), dada em função da altitude h e do θ_z ,

$$m = \frac{\exp(-0,0001184 h)}{\cos \theta_z + 0,5057(96,080 - \theta_z)^{-1,634}} \quad (3.25)$$

Assim, F_1 e F_2 foram determinados de acordo com as Equações 3.26 e 3.27, em que os coeficientes $f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{21}, f_{22}$ e f_{23} estão dispostos na Tabela 3.1 e são dados de acordo com os intervalos de valores de ε (PEREZ et al., 1990),

$$F_1 = \left[0, \left(f_{11} + f_{12} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{13} \right) \right] \quad (3.26)$$

$$F_2 = \left(f_{21} + f_{22} \Delta + \frac{\pi \theta_z}{180} f_{23} \right) \quad (3.27)$$

Tabela 3.1 - Coeficientes de brilho em função da claridade, para céu anisotrópico no modelo de Perez

Faixa de ε	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
1,000 – 1,065	-0,008	0,588	-0,062	-0,060	0,072	-0,022
1,065 – 1,230	0,130	0,683	-0,151	-0,019	0,066	-0,029
1,230 – 1,500	0,330	0,487	-0,221	0,055	-0,064	-0,026
1,500 – 1,950	0,568	0,187	-0,295	0,109	-0,152	0,014
1,950 – 2,800	0,873	-0,392	-0,362	0,226	-0,462	0,001
2,800 – 4,500	1,132	-1,237	-0,412	0,288	-0,823	0,056
4,500 – 6,200	1,060	-1,600	-0,359	0,264	-1,127	0,131
6,200 – ∞	0,678	-0,327	-0,250	0,156	-1,377	0,251

Fonte: Perez et al. (1990).

Após determinadas as componentes de radiação horária direta e difusa no plano inclinado, foi calculada a componente refletida. Foi considerado que existe uma superfície horizontal, de grande extensão e difusamente refletiva, com refletividade $\rho_g = 0,2$, que originava essa componente. Desta forma, obteve-se a radiação horária refletida na superfície inclinada, $I_{ref,inc}$, por meio da Equação 3.28.

$$I_{ref,inc} = I\rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.28)$$

Assim, a radiação horária total em uma superfície livre de sombreamento, com inclinação igual a β foi determinada somando as componentes direta, difusa e refletida das Equações 3.18, 3.19 e 3.28, respectivamente, obtendo a Equação 3.29.

$$I_T = I_b R_b + I_d \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{c_1}{c_2} + F_2 \operatorname{sen} \beta \right] + I\rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.29)$$

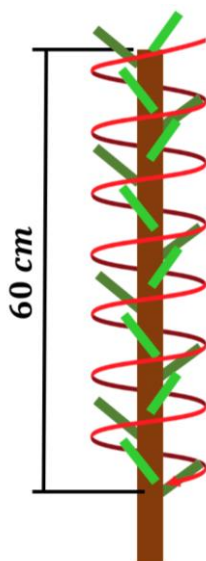
Modelos de árvores

Dois modelos distintos de plantas encontradas na natureza foram base de inspiração para a realização deste trabalho. Cada um desses modelos foi estudado para 16, 21, 25, 31, 41 e 61 folhas, sendo que cada folha foi representada por uma

única célula FV de comprimento $L = 5,3$ cm e largura $W = 1,8$ cm. Os modelos tiveram esses números de folhas escolhidos de modo a se comparar com os modelos estudados por Pinto (2018). Também foram escolhidos maiores números de folhas para analisar a possibilidade de uma maior eficiência de absorção de energia por área projetada. Considerou-se uma altura de copa fixa de 60 cm, assim como o trabalho de Pinto (2018), e raio do tronco $R_t = 0,8$ cm para todas as árvores.

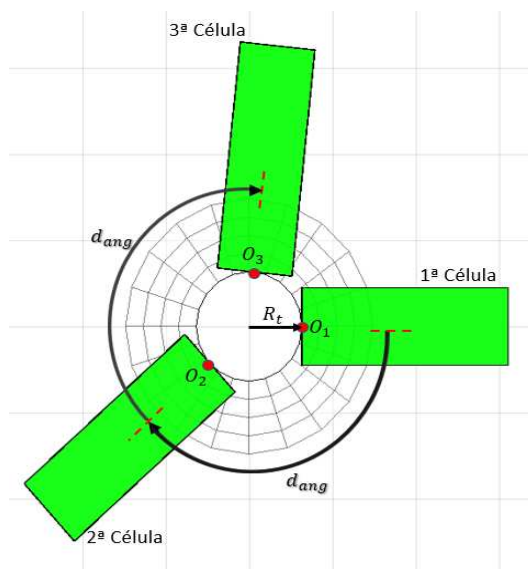
O primeiro modelo (M1) foi baseado em uma planta com as folhas dispostas em formato espiral, como mostrado na Figura 3.3. Este modelo possuía uma filotaxia espiralada, na qual cada célula FV estava posicionada em um nó distinto do tronco, formando uma espiral ao longo dele.

Figura 3.3 - Árvore solar do modelo M1, com 16 folhas, baseada em uma planta espiralada



De acordo com Bahadur et al. (2019), o distanciamento angular (d_{ang}) encontrado na natureza entre folhas sucessivas tende a um ângulo fixo de $137,5^\circ$ (padrão de Fibonacci 55/144), conhecido como ângulo áureo. Acredita-se que este distanciamento angular permite com que as folhas tenham uma otimização à exposição solar. Desta forma, neste estudo foi considerado esse valor para d_{ang} , como ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Vista superior: Ilustração do distanciamento angular (d_{ang}) entre células FV sucessivas; dos pontos de origem (O_n) das três primeiras células FV; e do raio do tronco (R_t) para o modelo M1

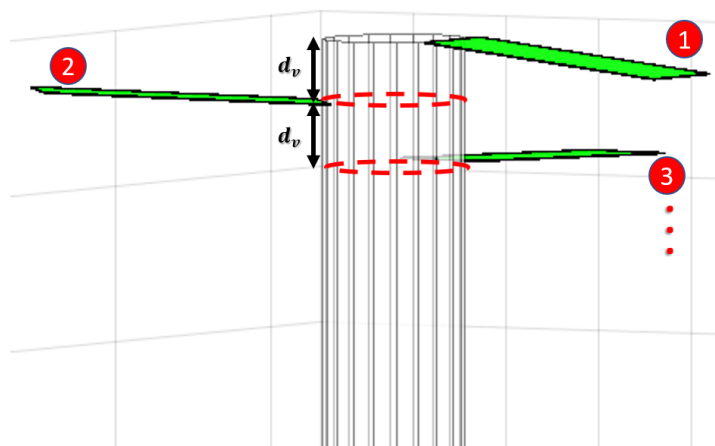


Como a altura da copa da árvore foi limitada a 60 cm, determinou-se o distanciamento vertical (d_v) entre folhas sucessivas como mostrado na Tabela 3.2. A Figura 3.5 ilustra d_v entre as três primeiras folhas da árvore do modelo M1.

Tabela 3.2 - Características das árvores solares fotovoltaicas simuladas para o modelo M1 baseado em uma planta espiralada

Nº de células FV	Distanciamento vertical	Altura da copa
	(cm)	(cm)
16	4,0	60
21	3,0	60
25	2,5	60
31	2,0	60
41	1,5	60
61	1,0	60

Figura 3.5 - Ilustração do distanciamento vertical (d_v) entre as três primeiras células FV da árvore solar do modelo M1

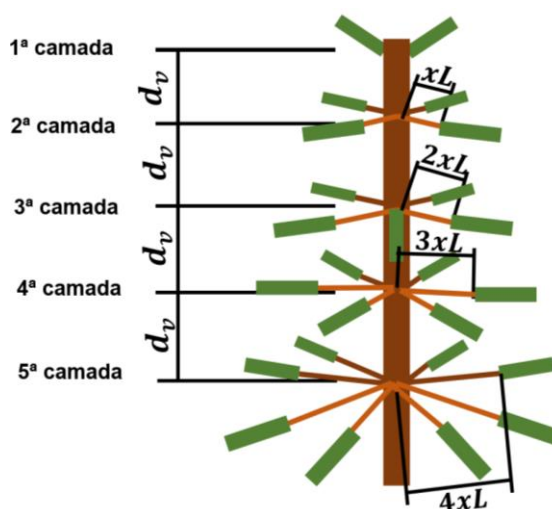


A área ocupada pela árvore do modelo M1, A_{M1} (m²), foi calculada considerando a área circular (Equação 3.30) projetada no solo, na qual o raio do círculo foi a soma do raio do tronco e do comprimento da célula FV, pois neste modelo as células foram conectadas diretamente ao tronco.

$$A_{M1} = \pi(R_t + L)^2 \quad (3.30)$$

O segundo modelo (M2) foi baseado em uma conífera. Para esse modelo foi considerado que a copa possuía uma forma geométrica semelhante à um cone, na qual os galhos de sua base eram maiores que os galhos da camada superior. O comprimento dos galhos foi considerado como sendo a distância entre o tronco e o ponto de origem de cada célula, como mostrado na Figura 3.6. Os galhos também foram divididos em camadas por um distanciamento vertical (d_v). Neste modelo, todos os pontos de origem das folhas de uma mesma camada estavam posicionados na mesma altura.

Figura 3. 6 - Árvore solar do modelo M2 baseada em uma conífera, com 25 folhas e 5 camadas



Nota-se que as células FV da primeira camada foram posicionadas diretamente no tronco. O comprimento dos galhos da camada seguinte foi considerado como sendo a multiplicação de x por L , em que x é um percentual específico para cada árvore simulada e L é o comprimento da célula FV. Assim, o valor resultante xL é o incremento no comprimento de cada galho das camadas subsequentes. Sendo assim, na segunda camada, o galho tinha um comprimento igual a xL . A terceira camada, por sua vez, foi $2xL$, e assim por diante, até a última camada.

Alguns valores de x foram calculados de modo que, ao determinar o perímetro de cada camada e distribuir o máximo de células FV (de acordo com a largura W de cada célula) por camada, se obtivessem árvores com 16, 21, 25, 31, 41 e 61 folhas, ou seja, iguais aos números de folhas simulados para o modelo M1. Ressalta-se que um único valor de x foi atribuído em todas as camadas de uma mesma árvore.

A decisão do número de camadas das árvores fotovoltaicas do modelo M2 foi feita a partir de simulações. O critério foi que, preferencialmente, a radiação solar em uma superfície inclinada igual à latitude, de mesma área ocupada pela árvore, tivesse um valor de radiação menor do que a do modelo de árvore em questão. Por este critério, foram necessárias árvores com no mínimo 5 e 6 camadas para as simulações do modelo M2. Desta forma, definiu-se os valores fixos de x para árvores com 5 e 6 camadas, bem como a quantidade de células FV em cada camada e o distanciamento vertical (d_v) entre camadas, como mostrado na Tabela 3.3. Frisa-se que neste

capítulo foi avaliada a radiação incidente nas células FV e não a energia elétrica gerada.

Tabela 3.3 - Características das árvores solares fotovoltaicas simuladas para o modelo M2, baseado em uma conífera

Nº de células FV	Quantidade de camadas	$x(\%)$	Quantidade de células FV por camada	Distanciamento vertical (cm)	Altura da copa (cm)
16	5	2,5	2,3,3,4,4	15	60
16	6	1,0	2,2,3,3,3,3	12	60
21	5	5,7	2,3,4,5,7	15	60
21	6	2,5	2,3,3,4,4,5	12	60
25	5	7,5	2,4,5,6,8	15	60
25	6	4,2	2,3,4,5,5,6	12	60
31	5	11,1	2,4,6,8,11	15	60
31	6	6,0	2,3,5,6,7,8	12	60
41	5	16,5	2,5,8,11,15	15	60
41	6	9,9	2,4,6,8,10,11	12	60
61	5	27,4	2,7,12,17, 23	15	60
61	6	17,0	2,5,9,12,15,18	12	60

Cada camada da árvore do modelo M2 tinha um distanciamento angular (d_{ang}) específico entre células, que foi calculado dividindo 360° pelo número de células existentes naquela camada.

Por fim, a área circular ocupada pela árvore do modelo M2, A_{M2} (m²), foi calculada conforme a Equação 3.31,

$$A_{M2} = \pi(R_t + C_{gm} + L)^2 \quad (3.31)$$

em que, C_{gm} é o comprimento do galho maior, entre o tronco e o ponto de origem de uma célula FV da última camada da árvore.

Sombreamento entre células fotovoltaicas

Nesta pesquisa foram analisados os sombreamentos gerados entre as células FV. Para determinar a área sombreada em cada célula fotovoltaica foi necessário, inicialmente, identificar o posicionamento delas no espaço.

Para as árvores do modelo M1, o ponto de origem de uma célula n (O_n) foi determinado considerando o raio do tronco (R_t), o distanciamento vertical (d_v) e o distanciamento angular (d_{ang}) entre as células FV subsequentes, como exemplificado nas Figuras 3.4 e 3.5.

As células FV foram enumeradas em ordem crescente do topo à base, e a de número 1, por exemplo, tinha seu ponto de origem dado pela Expressão 3.32, segundo a descrição em coordenadas retangulares

$$O_1 (R_t, \quad 0, \quad 60) \quad (3.32)$$

O ponto de origem de cada célula seguinte foi rotacionado no sentido horário em torno do eixo z de acordo com d_{ang} , e sua componente em z foi reduzida no valor equivalente à d_v .

A célula 1, por ser a célula superior, não era sombreada por nenhuma outra célula. A célula 2, segunda mais alta da estrutura, poderia ser sombreada apenas pela célula 1. Por sua vez, a célula 3 poderia ser sombreada somente pela célula 1 e célula 2. Seguindo essa lógica, a célula n poderia ser sombreada pelas $n - (1,2,3, \dots)$ células acima dela.

Já as árvores do modelo M2 tiveram os pontos de origem das células determinados a partir do raio do tronco (R_t), do comprimento do galho de cada camada, do distanciamento vertical (d_v) e do distanciamento angular (d_{ang}).

As células FV e as camadas também foram enumeradas em ordem crescente do topo à base. O ponto de origem da primeira célula de uma determinada camada, por exemplo, foi dado por (Expressão 3.33),

$$O_{1,C_a} (R_t + (C_a - 1)xL, \quad 0, \quad 60 - d_v(C_a - 1)) \quad (3.33)$$

em que C_a é a camada atual da célula FV analisada. As células seguintes da mesma camada foram rotacionadas no sentido horário em torno do eixo z de acordo com o d_{ang} . A camada seguinte tinha sua componente em z reduzida em um valor equivalente à d_v .

Para determinar a área sombreada da célula n em um determinado instante, primeiro estimou-se a área sombreada gerada pela célula 1 na célula n e a subtraiu-

se da área útil da célula n . Em seguida, repetiu-se o mesmo procedimento com a célula 2 em relação a célula n , também subtraindo-se a área útil líquida da célula n pela área sombreada gerada. Este processo foi repetido até se obter a área final sem sombreamento da célula n , depois de ter analisado todas as sombras geradas pelas $n - (1,2,3, \dots)$ células.

Assim, as áreas sombreadas foram determinadas uma por vez. A célula FV m (para $m < n$) originadora de sombra foi representada pelos vértices P_A, P_B, P_C e P_D . A célula FV n , a qual desejava-se saber a área sombreada, foi representada pelos vértices P_P, P_Q, P_R e P_S .

Com os pontos de origem O_1, O_2, \dots, O_n de cada uma das células FV identificados, empregou-se a metodologia utilizada por Dey e Pesala (2020) para encontrar os quatro vértices de cada uma delas. Os vértices P_A, P_B, P_C, P_D , em coordenadas retangulares, de uma célula FV m geradora de sombra, com orientação (β_m, γ_m) , ponto de origem O_m , comprimento (L) e largura (W), foram determinados de acordo com as Expressões 3.34 – 3.37.

$$P_A \left[\left(O_{m,x} - \left(\frac{W}{2} \right) \cos(\gamma_m + 180) \right), \left(O_{m,y} - \left(\frac{W}{2} \right) \sin(\gamma_m + 180) \right), (O_{m,z}) \right] \quad (3.34)$$

$$P_B \left[\left(P_{A,x} + L \cos(\beta_n) \sin(\gamma_n + 180) \right), \left(P_{A,y} + L \cos(\beta_n) \cos(\gamma_n + 180) \right), (P_{A,z} - L \sin(\beta_n)) \right] \quad (3.35)$$

$$P_C \left[\left(P_{A,x} - W \cos(\gamma_n + 180) \right), \left(P_{A,y} + W \sin(\gamma_n + 180) \right), (P_{A,z}) \right] \quad (3.36)$$

$$P_D \left[\left(P_{C,x} + L \cos(\beta_n) \sin(\gamma_n + 180) \right), \left(P_{C,y} + L \cos(\beta_n) \cos(\gamma_n + 180) \right), (P_{C,z} - L \sin(\beta_n)) \right] \quad (3.37)$$

De modo análogo, os quatro vértices P_P, P_Q, P_R e P_S da célula FV n , a qual desejava-se saber a área sombreada, com ponto de origem O_n , orientação (β_n, γ_n) , comprimento (L) e largura (W), também foram calculados.

Em seguida, determinou-se o vetor dos raios solares \vec{s} para cada hora do dia (Equação 3.38), de acordo com os ângulos relacionados ao posicionamento do sol:

ângulo de altitude solar (α_s) e ângulo de azimute solar (γ_s) (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2018).

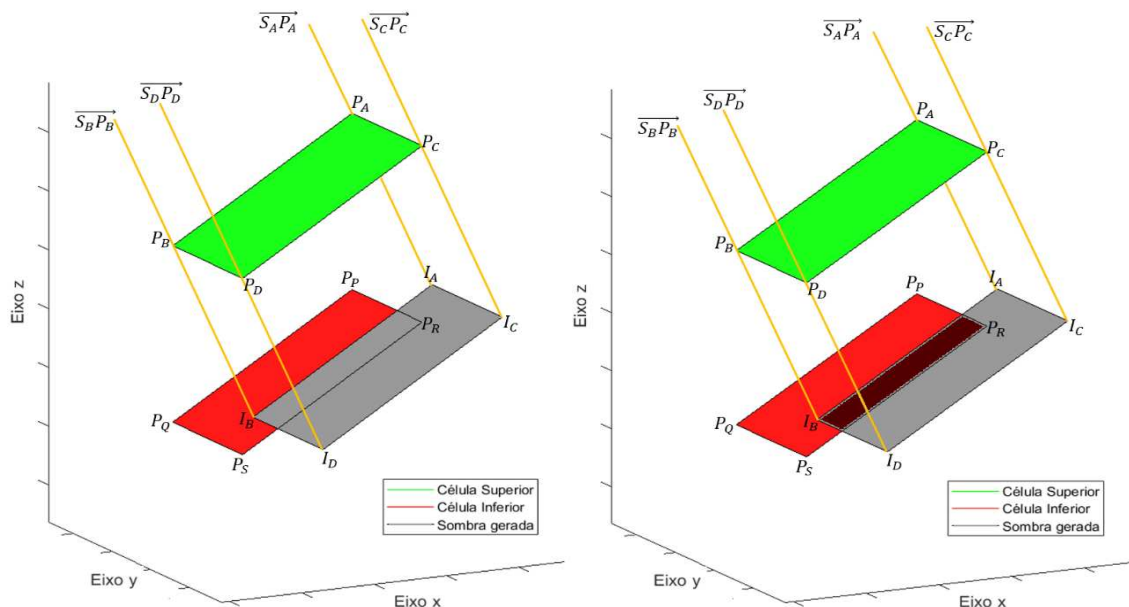
$$\vec{s} = [\cos\gamma_s \cos\alpha_s, \quad \text{sen}\gamma_s \cos\alpha_s, \quad \text{sen}\alpha_s] \quad (3.38)$$

De acordo com Dey e Pesala (2020), um segmento de reta foi criado, seguindo a direção do vetor \vec{s} , e passando pelo vértice P_A da célula superior. Em seguida, para encontrar um segundo ponto desse segmento de reta, utilizou-se a Equação 3.39, em que k foi um número inteiro constante.

$$S_A = P_A + k\vec{s} \quad (3.39)$$

Assim, o segmento de reta dos raios solares que passam pelo ponto P_A pode ser expresso por $\overline{S_A P_A}$. Isso também foi feito, de forma análoga, para os vértices P_B, P_C, P_D , de forma a determinar $\overline{S_B P_B}$, $\overline{S_C P_C}$ e $\overline{S_D P_D}$, como pode ser visualizado na Figura 3.7 (DEY; PESALA, 2020).

Figura 3.7 - (a) Projeção de sombra da célula FV superior na inferior. (b) Determinação da área sombreada



Com esses segmentos de reta foi possível projetar a sombra da célula FV superior no plano da célula inferior e determinar os vértices da sombra gerada (I_A, I_B, I_C, I_D). Para isso, um vetor normal (\vec{n}) à célula inferior foi encontrado de acordo com a Equação 3.40 (DEY; PESALA, 2020),

$$\vec{n} = \overrightarrow{P_P P_Q} \times \overrightarrow{P_P P_R} \quad (3.40)$$

Conforme a pesquisa de Dey e Pesala (2020), para determinar o vértice I_A referente à sombra gerada, foi necessário calcular dois vetores auxiliares, \vec{u} e \vec{w} , dados pelas Equações 3.41 e 3.42, considerando o ponto P_P da célula FV inferior e os pontos P_A e S_A do segmento de reta,

$$\vec{u} = \overrightarrow{OP_A} - \overrightarrow{OS_A} \quad (3.41)$$

$$\vec{w} = \overrightarrow{OS_A} - \overrightarrow{OP_P} \quad (3.42)$$

em que O é o ponto de origem de coordenadas (0,0,0).

Em seguida, para determinar se o segmento de reta era paralelo com o plano da superfície da célula FV, calculou-se o produto escalar entre o vetor normal do plano e o vetor \vec{u} (Equação 3.43),

$$D = \vec{n} \cdot \vec{u} \quad (3.43)$$

Se $|D| = 0$, o segmento de reta era paralelo à superfície, logo, não haveria sombra na célula FV inferior. Caso $|D| \neq 0$, os elementos não eram paralelos e as coordenadas do vértice $I_A(I_{Ax}, I_{Ay}, I_{Az})$ foram calculadas como mostrado nas Equações 3.44 a 3.46 (DEY; PESALA, 2020),

$$I_{Ax} = S_{Ax} + \left(\frac{N}{D} u_x\right) \quad (3.44)$$

$$I_{Ay} = S_{Ay} + \left(\frac{N}{D} u_y\right) \quad (3.45)$$

$$I_{Az} = S_{Az} + \left(\frac{N}{D} u_z\right) \quad (3.46)$$

em que N foi dada por (Equação 3.47),

$$N = -(\vec{n} \cdot \vec{w}) \quad (3.47)$$

De maneira análoga, os procedimentos relacionados entre as Equações 3.41 a 3.47 foram repetidos de modo a determinar as coordenadas retangulares dos pontos I_B, I_C, I_D (DEY; PESALA, 2020).

Assim, foi possível determinar a área sombreada da célula FV inferior calculando a área de interseção entre ela e a sombra gerada (Figura 3.7 - b). Após analisar todas as $n - (1,2,3, \dots)$ células acima e de mesma altura da célula n , calculou-se o percentual da área final sombreada da célula n .

Por fim, de acordo com Dey e Pesala (2020), a área sombreada interfere apenas a componente direta da radiação incidente na superfície do gerador fotovoltaico. Sendo assim, ajustando a Equação 3.29, foi possível determinar a radiação incidente em cada célula FV considerando o sombreamento, de acordo com a Equação 3.48,

$$I_T = A_{cel} \left\{ I_b R_b (1 - S) + I_d \left[(1 - F_1) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{c_1}{c_2} + F_2 \sin \beta \right] + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right\} \quad (3.48)$$

em que S é o percentual de área sombreada da célula FV e A_{cel} é a área da célula, dada por (Equação 3.49),

$$A_{cel} = LW \quad (3.49)$$

3.3.2. Simulação da radiação solar incidente em árvores solares fotovoltaicas

As árvores solares foram simuladas para três cidades situadas no território brasileiro, sendo elas: Viçosa – MG (latitude: 20° 45' 14" S; longitude: 42° 52' 54" O; e altitude: 659 m); Boa Vista – RR (latitude: 2° 49' 10" N, longitude 60° 40' 17" O; e altitude: 85 m); e Chuí – RS (latitude: 33° 41' 27" S, longitude 53° 27' 25" O; e altitude: 22 m).

Os dados de média mensal da radiação solar diária típica (H) para cada cidade foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os valores de radiação foram gerados a partir de uma amostra de mais de 17 anos de dados de satélites com a implementação de avanços nas parametrizações do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR (PEREIRA et al., 2017). Para essa etapa de simulação foram utilizados os dias médios de cada mês de acordo com Oliveira Jr. (2015), de modo a determinar a média mensal da radiação solar diária em cada célula FV e, conseqüentemente, em cada árvore.

Foram realizadas 18 simulações de árvores para cada cidade, sendo 6 árvores do modelo M1 com 16, 21, 25, 31, 41 e 61 células FV e 12 árvores do modelo M2, também com as mesmas quantidades de células por árvore. A diferença foi que no modelo M2 foram simuladas duas árvores para cada valor total de células FV, isto é, foram simuladas 6 árvores considerando apenas 5 camadas, e 6 árvores

considerando 6 camadas. A Tabela 3.4 resume as 18 árvores simuladas para cada cidade. Além dos 18 casos descritos, foi também simulada a otimização da orientação de uma única célula FV, bem como a radiação incidente nela. Essa célula FV serviu como testemunha para comparação com as simulações de árvore solar.

Tabela 3.4 - Árvores simuladas para as cidades de Viçosa – MG, Boa Vista – RR e Chuí – RS, em que Modelo 1 refere-se a espiralada e Modelo 2 a conífera

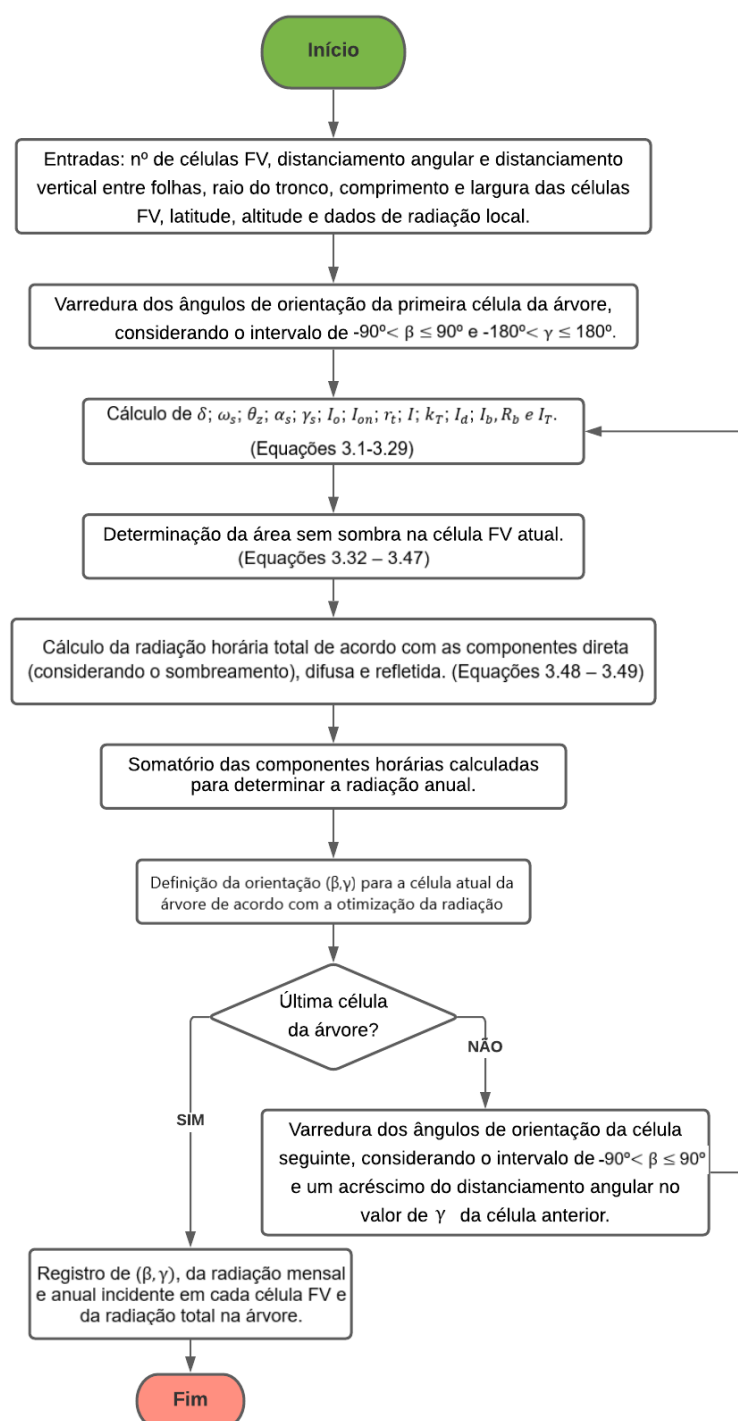
Nome	Descrição	Nome	Descrição
M1_16C	Modelo 1, 16 células FV	M2_31C_5	Modelo 2, 31 células FV, 5 camadas
M1_21C	Modelo 1, 21 células FV	M2_41C_5	Modelo 2, 41 células FV, 5 camadas
M1_25C	Modelo 1, 25 células FV	M2_61C_5	Modelo 2, 61 células FV, 5 camadas
M1_31C	Modelo 1, 31 células FV	M2_16C_6	Modelo 2, 16 células FV, 6 camadas
M1_41C	Modelo 1, 41 células FV	M2_21C_6	Modelo 2, 21 células FV, 6 camadas
M1_61C	Modelo 1, 61 células FV	M2_25C_6	Modelo 2, 25 células FV, 6 camadas
M2_16C_5	Modelo 2, 16 células FV, 5 camadas	M2_31C_6	Modelo 2, 31 células FV, 6 camadas
M2_21C_5	Modelo 2, 21 células FV, 5 camadas	M2_41C_6	Modelo 2, 41 células FV, 6 camadas
M2_25C_5	Modelo 2, 25 células FV, 5 camadas	M2_61C_6	Modelo 2, 61 células FV, 6 camadas

Além disso, para fins de comparação, foram realizadas simulações com dados de radiação solar horária para a cidade de Viçosa – MG. Para isso, foi utilizado o arquivo climático TMY3 (*Typical Meteorological Year*) disponibilizado pelo INMET (2016). As simulações com dados horários foram realizadas para os casos com 16 e 61 células FV dos dois modelos estudados.

Para realizar os cálculos de radiação incidente na árvore solar fotovoltaica foi necessário identificar os ângulos β e γ de cada célula fotovoltaica, de modo a maximizar a radiação total anual absorvida pela árvore solar, considerando o sombreamento.

A simulação foi realizada com o auxílio do *software* MATLAB®. O ângulo β de cada célula FV foi variado no intervalo de -90° a 90° , com incrementos de 1° . Para o modelo M1, o ângulo γ da primeira célula varia o intervalo de -180° a 180° , também com incremento de 1° , até encontrar o γ ótimo para a primeira célula. Após definido o γ da primeira célula, as células seguintes tinham o valor de $d_{ang}=137,5^\circ$ incrementado ao valor de γ da célula anterior, conforme discriminado na seção anterior. O escopo do código criado para simular as árvores do modelo M1 pode ser visualizado na Figura 3.8.

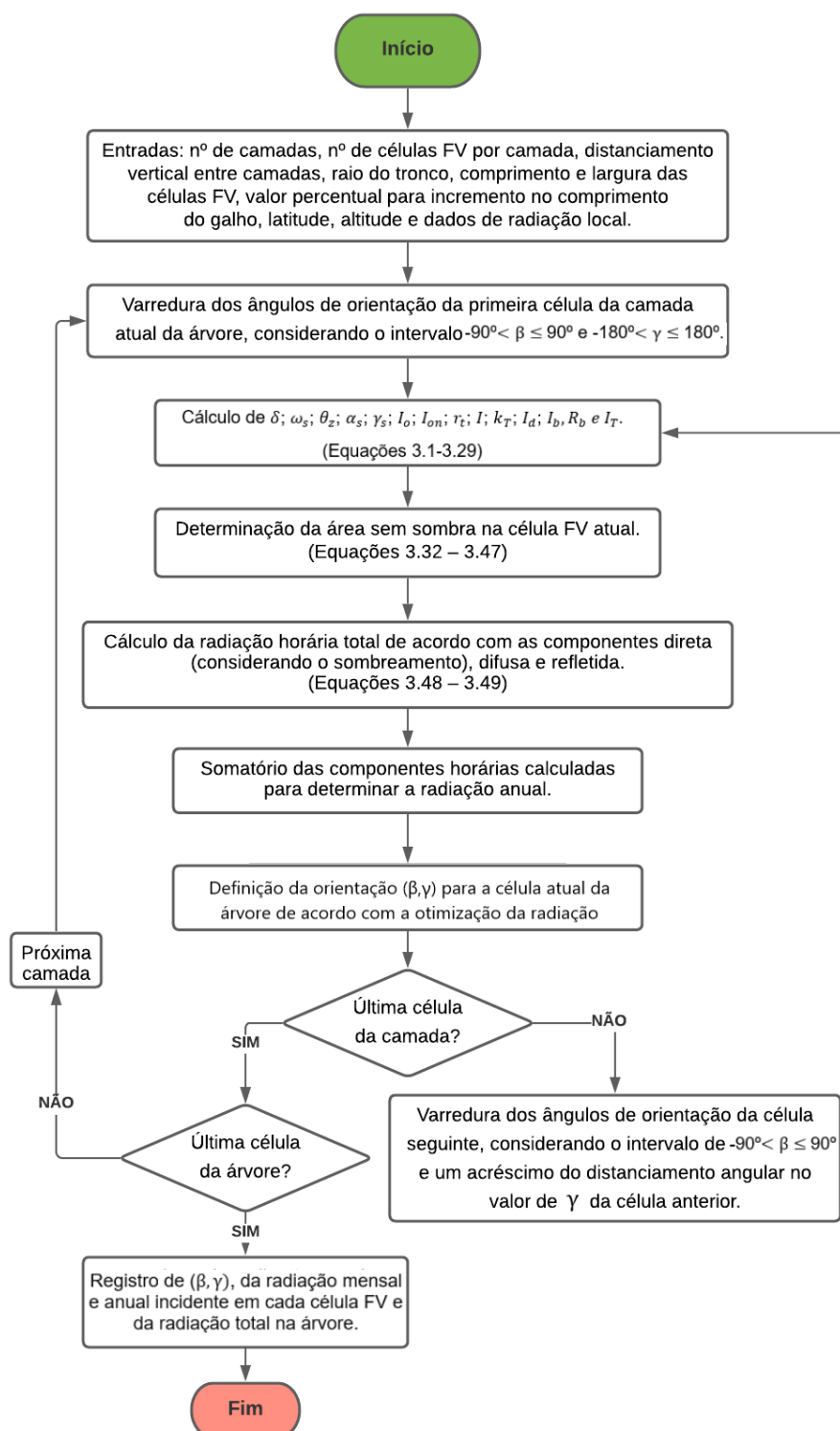
Figura 3.8 - Fluxograma para determinação da orientação e da radiação incidente em cada célula FV, e cálculo da radiação solar total na árvore do modelo M1



Para o modelo M2, o γ ideal da primeira célula de cada camada foi determinado de modo semelhante ao procedimento realizado no modelo M1. Uma vez definido este valor, as células seguintes daquela mesma camada tinham o valor de d_{ang} incrementado ao valor de γ da célula anterior, até ficarem uniformemente distribuídas

naquela camada. O ângulo β de cada célula FV foi determinado variando no intervalo de -90° a 90° , com incrementos de 1° . O escopo do código desenvolvido para o modelo M2 encontra-se ilustrado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Fluxograma para determinação da orientação e da radiação incidente em cada célula FV, e cálculo da radiação solar total na árvore do modelo M2



3.4. Resultados e discussão

Ao realizar as simulações com os dados médios mensais da radiação solar diária para as cidades de Viçosa – MG, Boa Vista – RR e Chuí – RS, foi possível determinar os ângulos de inclinação e de azimute para cada célula FV de modo a maximizar a radiação anual incidente nas árvores solares. As Tabelas 3.5 e 3.6 mostram os valores de β e γ para as 6 árvores simuladas do modelo M1 para Viçosa – MG. Os ângulos encontrados para as cidades de Boa Vista – RR e Chuí – RS encontram-se nas Tabelas A1, A2, A3 e A4 do Apêndice A.

Tabela 3.5 - Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 16, 21, 25 e 31 células FV do modelo M1, na cidade de Viçosa – MG

Célula	γ (°)	β (°)			
		M1_16C	M1_21C	M1_25C	M1_31C
1	180,0	21	21	21	21
2	-42,5	-10	-10	-11	-11
3	95,0	4	5	5	5
4	-127,5	15	15	15	15
5	10,0	-15	-16	-17	-15
6	147,5	20	20	19	20
7	-75,0	-2	0	0	0
8	62,5	-7	-5	-5	-5
9	-160,0	20	20	20	20
10	-22,5	-15	-14	-15	-20
11	115,0	11	12	12	12
12	-107,5	9	9	9	9
13	30,0	-15	-15	-15	-10
14	167,5	20	20	20	20
15	-55,0	-9	-7	-8	-10
16	82,5	0	0	0	0
17	-140,0		18	18	18
18	-2,5		-20	-20	-20
19	135,0		17	20	17
20	-87,5		0	0	0
21	50,0		-12	-12	-6
22	-172,5			21	20
23	-35,0			-13	-16
24	102,5			8	9
25	-120,0			13	13
26	17,5				-13
27	155,0				20
28	-67,5				-5
29	70,0				-2
30	-152,5				20
31	-15,0				-20

Tabela 3.6 - Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 41 e 61 células do modelo M1, na cidade de Viçosa - MG

Célula	γ (°)	β (°)		Célula	γ (°)	β (°)	
		M1_41C	M1_61C			M1_41C	M1_61C
1	180,0	21	21	32	122,5	15	15
2	-42,5	-12	-12	33	-100,0	6	5
3	95,0	6	7	34	37,5	-8	-12
4	-127,5	15	16	35	175	20	20
5	10,0	-12	-10	36	-47,5	-16	-5
6	147,5	19	19	37	90,0	6	5
7	-75,0	0	0	38	-132,5	16	15
8	62,5	-2	-3	39	5,0	-16	-15
9	-160,0	20	20	40	142,5	19	20
10	-22,5	-20	-12	41	-80,0	0	0
11	115,0	13	12	42	57,5		-6
12	-107,5	9	10	43	-165,0		20
13	30,0	-11	-12	44	-27,5		-12
14	167,5	20	20	45	110,0		11
15	-55,0	-10	-20	46	-112,5		11
16	82,5	5	0	47	25,0		-15
17	-140,0	18	20	48	162,5		20
18	-2,5	-20	-15	49	-60,0		0
19	135,0	18	20	50	77,5		0
20	-87,5	0	0	51	-145,0		20
21	50,0	-5	-7	52	-7,5		-20
22	-172,5	20	20	53	130,0		20
23	-35,0	-20	-20	54	-92,5		0
24	102,5	9	9	55	45,0		-9
25	-120,0	15	13	56	-177,5		20
26	17,5	-13	-20	57	-40,0		-20
27	155,0	19	20	58	97,5		8
28	-67,5	0	0	59	-125,0		15
29	70,0	-1	0	60	12,5		-20
30	-152,5	20	20	61	150		20
31	-15,0	-20	-15				

Ao analisar, inicialmente, a primeira célula FV de cada árvore, foi observado que o posicionamento ótimo (β, γ) encontrado para a cidade de Viçosa – MG, Boa Vista – RR e Chuí – RS foi de (21°, 180°), (4°, 0°) e (26°, 180°), respectivamente. Ou seja, constatou-se que o ângulo β otimizado para a primeira célula FV de cada árvore foi igual ao módulo da latitude, $|\phi|$, apenas para a cidade de Viçosa – MG. Para Boa Vista – RR e Chuí – RS, o β otimizado para a primeira célula FV apresentou valores em torno de $|\phi|+1^\circ$, $|\phi|-8^\circ$, respectivamente. O valor de β ótimo encontrado para Chuí – RS foi próximo ao ângulo de inclinação ótimo de $|\phi|-7^\circ$ encontrado por Kallioglu et al. (2019) para estudos com otimização de radiação anual em cidades com latitudes

entre 36° N e 41° N. Abdallah et al. (2020) encontraram um β ótimo anual de $|\phi|-3^\circ$ para cidades com latitudes próximas a 32° N. Já Santos e Rütther (2014) encontraram um β ótimo para Boa Vista – RR de 3°, isto é, 1° a menos do que encontrado neste estudo. Essas variações nos valores do β ótimo podem ser justificadas em razão das mudanças significativas de radiação solar para locais com uma mesma latitude devido ao efeito das nuvens e outras condições climáticas. Além disso, a base de dados de radiação solar utilizada também pode ser responsável por essas diferenças.

Ainda para a primeira célula FV, os ângulos γ encontrados revelaram que, para as localidades no hemisfério sul, a otimização da radiação incidente se deu ao direcionar a célula FV ao norte ($\gamma = 180^\circ$), e para a localidade no hemisfério norte, foi otimizado direcionando-se a célula FV ao sul ($\gamma = 0^\circ$). Esses resultados também foram evidenciados em estudos como os de Ullah et al. (2019), Santos e Rütther (2014) e Abdallah et al. (2020).

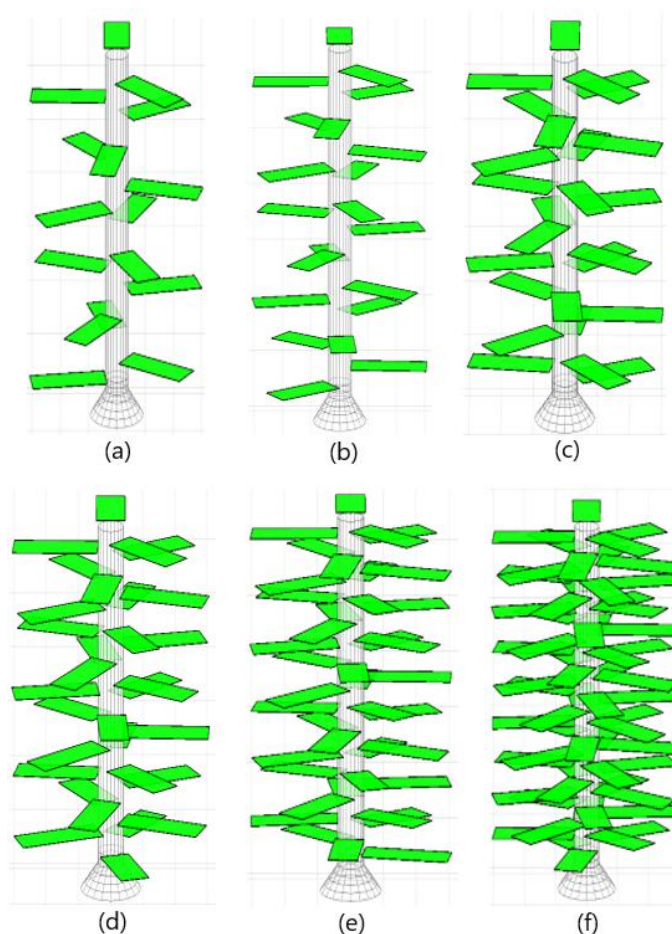
Para as demais células FV, notou-se que os valores ótimos de β encontrados para a cidade de Viçosa estavam no intervalo de -20° a 21° , mudando de acordo com o γ e o sombreamento que cada célula FV estava sujeita. Todos os casos em que $\beta < 0$, o γ estava no intervalo de -90° a 90° , ou seja, a célula FV estava voltada ao hemisfério sul (Figura 3.1). Para γ em torno de 180° , observou-se valores de β próximos à latitude. Para a cidade de Chuí – RS, β estava entre -25° e 26° , em que $\beta < 0$ para todas as células com ângulo γ entre $-67,5^\circ$ a $62,5^\circ$, e $\beta > 0$ para os demais casos. Já para Boa Vista – RR, β estava entre -2° e 6° , assumindo diferentes valores nesse intervalo sem demonstrar um padrão diretamente relacionado com os valores de γ como nas demais cidades.

Observou-se também que o β ótimo de uma determinada célula pode apresentar valores diferentes para cada árvore distinta do modelo M1, apesar do γ ser o mesmo. Por exemplo, a célula 2 das árvores simuladas na cidade de Viçosa – MG apresentou $\beta = -10^\circ$ para os modelos M1_16C e M1_21C, $\beta = -11^\circ$ para os modelos M1_25C e M1_31C e $\beta = -12^\circ$ para os modelos M1_41C e M1_61C. Isso pode ter ocorrido devido aos diferentes distanciamentos verticais entre as células aplicados em cada caso. As células da árvore M1_16C foram mais espaçadas verticalmente entre si, quando comparadas com as outras árvores simuladas do modelo M1. Por sua vez, as células da árvore M1_61C eram mais próximas verticalmente, podendo ter maiores

influências devido ao sombreamento e, conseqüentemente, assumir outros valores de β .

Após determinados os ângulos β e γ de cada célula FV, foram geradas as imagens das árvores para o modelo M1. A Figura 3.10 mostra as seis árvores do modelo M1 simuladas para a cidade de Viçosa – MG.

Figura 3.10 - Projeto das árvores solares do modelo M1 com os ângulos encontrados em simulação para a cidade de Viçosa – MG, com (a) 16; (b) 21; (c) 25; (d) 31; (e) 41; e (f) 61 células FV



Em seguida, foi determinada a radiação solar anual otimizada em cada célula FV para todas as árvores do modelo M1. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram a distribuição da radiação solar anual em cada célula FV para as árvores com 16 e 61 células, respectivamente, na cidade de Viçosa – MG. A radiação solar anual otimizada para os demais casos do modelo M1 em Viçosa – MG, bem como para as cidades de Boa Vista – RR e Chuí – RS encontram-se no Apêndice B.

Figura 3.11 - Radiação solar anual para as células da árvore M1_16C, em Viçosa – MG

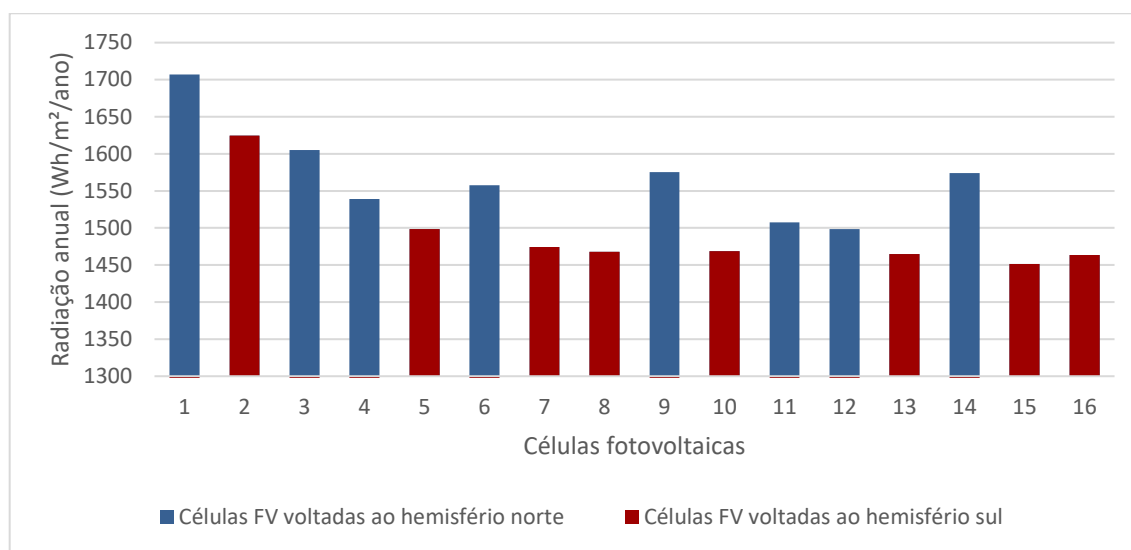
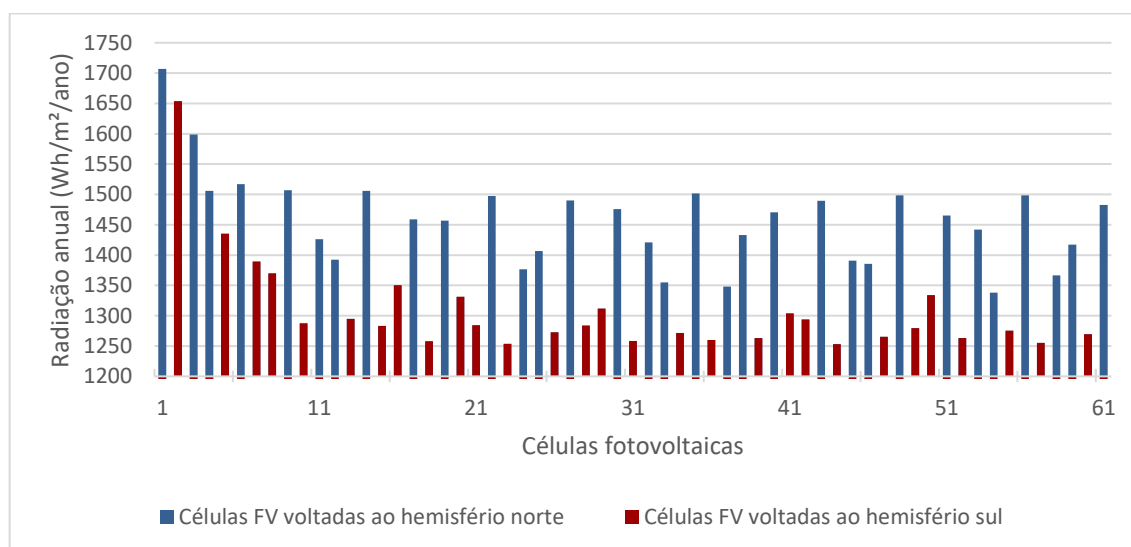


Figura 3.12 - Radiação solar anual para as células da árvore M1_61C, em Viçosa – MG



Verificou-se que, em todas as árvores, a primeira célula FV foi a que mais recebeu radiação solar, tendo exatamente os mesmos ângulos de orientação e radiação solar incidente que a célula FV otimizada do caso testemunho. A primeira célula para Viçosa – MG, Boa Vista – RR e Chuí – RS recebeu 1707,00, 1693,82, 1657,98 Wh/m²/ano, respectivamente. Analisando a árvore M1_16C para Viçosa – MG, a célula FV que recebeu a menor radiação solar foi a célula 15, com 1451,25 Wh/m²/ano. A célula 15 foi a penúltima da árvore, tendo perdas por sombreamento

das células acima dela, além de ter $\gamma = -55^\circ$, ou seja, mais direcionada ao sul do que a célula 16, com $\gamma = 82,5^\circ$. Já na árvore M1_61C, a célula 44, também voltada ao hemisfério sul, com $\gamma = -27,5^\circ$, foi a que obteve a radiação mínima, no valor de 1253,23 Wh/m²/ano. Notou-se que devido a maior quantidade de células FV e, conseqüentemente, ao menor distanciamento vertical entre elas, houve maiores perdas de radiação incidente na árvore com 61 células devido ao sombreamento.

A Tabela 3.7 mostra os valores de radiação anual total por árvore e radiação média anual por célula FV nas simulações do modelo M1 para a cidade de Viçosa – MG. Constatou-se que a árvore M1_61C obteve a maior radiação anual total, com 84,53 kWh/m²/ano. Entretanto, a mesma árvore obteve a maior perda devido ao sombreamento entre células FV, com 16,64%, e conseqüentemente, a menor radiação média anual por célula FV, com apenas 1385,72 Wh/m²/ano.

Uma outra análise pôde ser feita ao se comparar a radiação média anual por célula FV de uma árvore com a radiação incidente em uma célula FV com β otimizado, que no caso de Viçosa – MG, foi igual ao módulo da latitude, e $\gamma=180^\circ$ (caso testemunho). Com isso, constatou-se uma redução máxima de radiação de cerca de 18,82% para o caso M1_61C. Então, construir uma árvore do modelo M1_61C faz com que as células FV recebam, em média, cerca de 18,82% a menos de radiação solar do que se a célula FV estivesse com orientação otimizada ($\beta=|\phi|$ e $\gamma=180^\circ$).

Tabela 3.7 - Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores do modelo M1 para a cidade de Viçosa - MG

Árvore	Radiação anual total (kWh/m ² /ano)	Perda por sombreamento (%)	Radiação média anual por célula FV (Wh/m ² /ano)	Redução da radiação média anual por célula FV (%) *
M1_16C	24,48	7,92	1529,79	10,38
M1_21C	31,65	9,28	1507,04	11,71
M1_25C	37,35	10,08	1494,06	12,47
M1_31C	45,59	11,56	1470,51	13,85
M1_41C	58,97	13,44	1438,40	15,74
M1_61C	84,53	16,64	1385,72	18,82

* Redução da radiação média anual por célula FV da árvore em relação a radiação anual em uma célula FV com inclinação otimizada (no caso de Viçosa – MG, $\beta=|\phi|$ e $\gamma=180^\circ$).

Os valores referentes às outras duas cidades encontram-se nas Tabelas A5 e A6 do Apêndice A. De modo análogo, o modelo M1_61C para Boa Vista – RR foi o que obteve a maior radiação anual total, com 81,78 kWh/m²/ano, apresentando uma perda por sombreamento de 20,72% e menor radiação média anual por célula FV de 1340,68 Wh/m²/ano. Já para Chuí – RS, o modelo M1_61C conseguiu 82,31 kWh/m²/ano, com uma perda por sombreamento de 15,24% e menor radiação média anual por célula FV de 1349,40 Wh/m²/ano. Assim, constatou-se que as árvores simuladas para Boa Vista – RR foram as que apresentaram maiores perdas por sombreamento, quando comparadas às outras duas localidades.

Para as cidades de Boa Vista – RR e Chuí – RS, encontraram-se, respectivamente, as reduções de 20,85% e 18,61% da radiação média anual por célula FV da árvore quando comparadas com a radiação incidente em uma célula FV com orientação otimizada, para o caso M1_61C, como pode ser visualizado nas Tabelas A5 e A6 do Apêndice A. Quando comparadas com a radiação incidente em uma célula FV com inclinação igual ao módulo da latitude das duas cidades, as reduções foram de 20,84% e 18,00%.

A área projetada pela árvore do modelo M1 foi de 116,90 cm². O valor foi igual para todas as árvores desse modelo, visto que foi calculada a área circular ocupada considerando o raio do tronco e o comprimento da célula FV, como mostrado na Equação 3.30. Considerando essa mesma área, poderiam ser instaladas o equivalente a “13,13” células FV com orientação otimizada para Viçosa – MG, “12,27” para Boa Vista – RR e “14,78” para Chuí – RS. A Tabela 3.8 exhibe o ganho de radiação solar por área projetada empregando os diferentes casos de árvore fotovoltaica do modelo M1 em vez de instalar um sistema FV de mesma área equivalente, com orientação otimizada.

Tabela 3.8 - Ganho de radiação solar por área projetada para árvores do modelo M1 em relação à sistema FV de mesma área com orientação otimizada

Árvore	Ganho de radiação solar devido a área ocupada (%)		
	Viçosa – MG	Boa Vista – RR	Chuí – RS
M1_16C	9,25	18,42	-1,72
M1_21C	41,25	51,56	27,11
M1_25C	66,71	77,36	49,99
M1_31C	103,46	115,08	82,91
M1_41C	163,22	176,24	136,65
M1_61C	277,28	293,55	238,43

Desta forma, foi possível concluir que o único caso em que não se obteve um ganho de radiação solar por área, empregando a árvore fotovoltaica do modelo M1, foi o M1_16C para a cidade de Chuí – RS. Isto é, para esse caso, instalar o equivalente a “14,78” células FV com orientação otimizada receberia um maior valor de radiação solar anual do que instalar uma árvore do modelo M1 com 16 células.

Por outro lado, o modelo M1_61C para a cidade de Boa Vista – RR apresentou o maior ganho por área, com cerca de 293,55%. Pode-se ver este valor como uma vantagem de projeto caso o objetivo seja maximizar a radiação por unidade de área, e possivelmente, maximizar a geração de energia elétrica, como pode ser o caso de edifícios em que o alvo seja a independência energética. Estudos relacionados ao ganho na geração de energia elétrica ainda devem ser realizados. Deve-se ressaltar que, por mais que haja um ganho significativo de radiação incidente, também haverá custos adicionais por instalar 61 células em vez de “12,27”. Houve um aumento de aproximadamente 397,15% no número de células FV para um ganho de radiação por área de 293,55%. Desta forma, a razão entre o aumento do número de células FV e o ganho de radiação por área foi de 1,35. Isto é, para este caso, a captação da radiação solar pela árvore em relação à um sistema FV com orientação otimizada, com a mesma área projetada, seria cerca de 35% mais cara, desconsiderando outros custos adicionais que possam existir com o aumento do número de geradores FV.

Para as árvores do modelo M2, as simulações determinaram os valores de β e γ das células FV para os 12 casos estudados de cada cidade. As Tabelas 3.9 e 3.10 mostram os valores de β e γ para as árvores M2_31C_5, M2_31C_6, M2_61C_5 e M2_61C_6 simuladas para Viçosa – MG. Os demais casos para Viçosa – MG e

resultados para Boa Vista - RR e Chuí - RS encontram-se nas Tabelas A7, A8, A9, A10, A11 e A12 do Apêndice A.

Tabela 3.9 - Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 31 células do modelo M2, com 5 e 6 camadas, na cidade de Viçosa - MG

Célula	M2_31C_5		M2_31C_6	
	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
1	180,0	21	180,0	21
2	0,0	-17	0,0	-17
3	-90,0	0	-60,0	-10
4	0,0	-20	60,0	-8
5	90,0	0	180,0	20
6	180,0	20	-108,0	8
7	-120,0	10	-36,0	-14
8	-60,0	-10	36,0	-14
9	0,0	-19	108,0	5
10	60,0	-10	180,0	20
11	120,0	10	-120,0	10
12	180,0	20	-60,0	-10
13	-135,0	16	0,0	-18
14	-90,0	0	60,0	-10
15	-45,0	-10	120,0	10
16	0,0	-17	180,0	20
17	45,0	-14	-129,0	15
18	90,0	0	-77,6	0
19	135,0	20	-26,1	-15
20	180,0	19	25,3	-17
21	-163,0	20	76,7	-7
22	-130,3	15	128,1	10
23	-97,5	4	179,6	19
24	-64,8	-8	180,0	20
25	-32,1	-16	-135,0	16
26	0,6	-18	-90,0	0
27	33,4	-15	-45,0	-10
28	66,1	-8	0,0	-17
29	98,8	4	45,0	-13
30	131,5	15	90,0	0
31	164,3	19	135,0	16

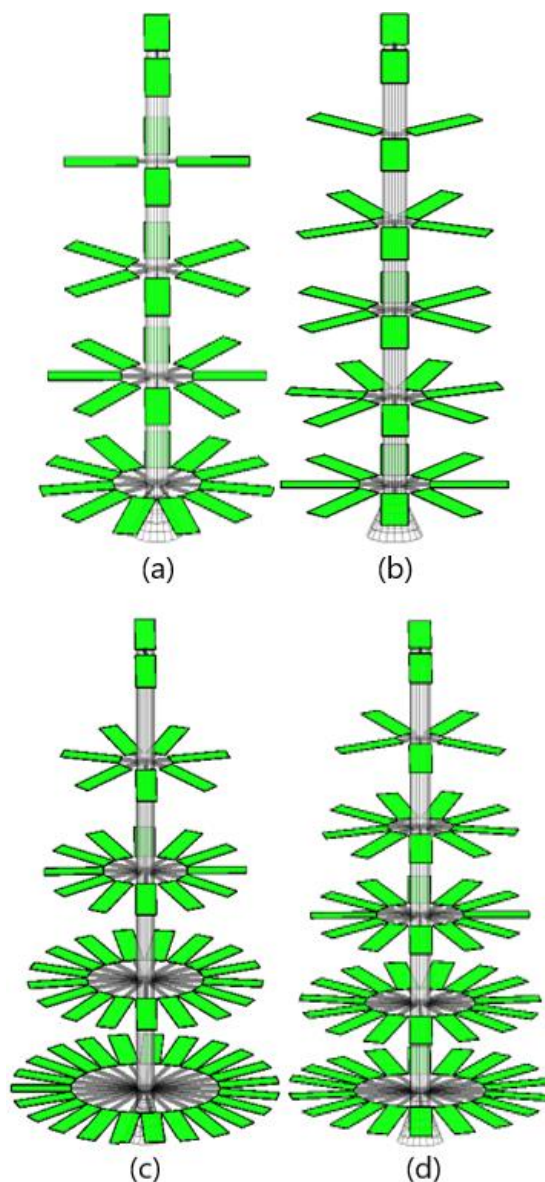
Tabela 3.10 - Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 61 células, com 5 e 6 camadas, do modelo M2, para a cidade de Viçosa - MG

Célula	M2_61C_5		M2_61C_6		Célula	M2_61C_5		M2_61C_6	
	γ (°)	β (°)	γ (°)	β (°)		γ (°)	β (°)	γ (°)	β (°)
1	180,0	21	180,0	21	32	52,8	-12	-84,0	-3
2	0,0	-17	0,0	-17	33	73,9	-6	-60,0	-10
3	-129,0	14	-108,0	8	34	95,1	2	-36,0	-15
4	-77,6	-3	-36,0	-14	35	116,3	10	-12,0	-16
5	-26,1	-15	36,0	-13	36	137,5	15	12,0	-17
6	25,3	-14	108,0	10	37	158,6	18	36,0	-17
7	76,7	-1	180,0	20	38	179,8	19	60,0	-12
8	128,1	16	-140,0	17	39	-168,0	20	84,0	-1
9	179,6	20	-100,0	7	40	-152,3	19	108,0	7
10	-150,0	19	-60,0	-10	41	-136,7	16	132,0	11
11	-120,0	10	-20,0	-15	42	-121,0	12	156,0	16
12	-90,0	2	20,0	-17	43	-105,4	6	180,0	18
13	-60,0	-9	60,0	-10	44	-89,7	0	180,0	20
14	-30,0	-14	100,0	2	45	-74,1	-6	-160,0	19
15	0,0	-16	140,0	15	46	-58,4	-10	-140,0	17
16	30,0	-15	180,0	19	47	-42,8	-15	-120,0	10
17	60,0	-10	-150,0	18	48	-27,1	-16	-100,0	0
18	90,0	0	-120,0	11	49	-11,5	-16	-80,0	-10
19	120,0	11	-90,0	1	50	4,2	-16	-60,0	-10
20	150,0	15	-60,0	-10	51	19,8	-15	-40,0	-10
21	180,0	19	-30,0	-15	52	35,5	-15	-20,0	-14
22	-159,0	19	0,0	-18	53	51,1	-13	0,0	-16
23	-137,8	17	30,0	-15	54	66,8	-9	20,0	-15
24	-116,6	11	60,0	-11	55	82,4	-3	40,0	-16
25	-95,5	3	90,0	0	56	98,1	3	60,0	-11
26	-74,3	-5	120,0	11	57	113,7	9	80,0	-5
27	-53,1	-11	150,0	17	58	129,4	14	100,0	3
28	-31,9	-15	180,0	19	59	145,0	17	120,0	10
29	-10,8	-18	-156,0	19	60	160,7	19	140,0	16
30	10,4	-17	-132,0	15	61	176,3	19	160,0	18
31	31,6	-16	-108,0	5					

A primeira célula FV dos casos estudados do modelo M2 obteve os mesmos valores ótimos de β e γ que foram encontrados para o modelo M1 em cada cidade. Consequentemente, a mesma radiação máxima foi encontrada nesta célula FV, visto que nenhuma outra célula FV a sombreava.

A Figura 3.13 ilustra os casos M2_31C_5, M2_31C_6, M2_61C_5 e M2_61C_6 para a cidade de Viçosa – MG, considerando os ângulos β e γ encontrados com a simulação.

Figura 3.13 - Projeto das árvores solares do modelo M2 com os ângulos encontrados em simulação para a cidade de Viçosa – MG, sendo (a) 31 células FV com 5 camadas; (b) 31 células FV com 6 camadas; (c) 61 células FV com 5 camadas; e (d) 61 células FV com 6 camadas



A radiação solar anual em cada célula FV foi determinada para todas as 12 árvores estudadas do modelo M2, para cada uma das três cidades. As Figuras 3.14 e 3.15 mostram a distribuição da radiação solar anual em cada célula FV para as árvores M2_61C_5 e M2_61C_6, respectivamente, na cidade de Viçosa – MG. A radiação solar anual para os demais casos, incluindo para as localidades de Boa Vista – RR e Chuí – RS encontram-se no Apêndice B.

Figura 3.14 - Radiação solar anual para as células da árvore M2_61C_5, em Viçosa – MG

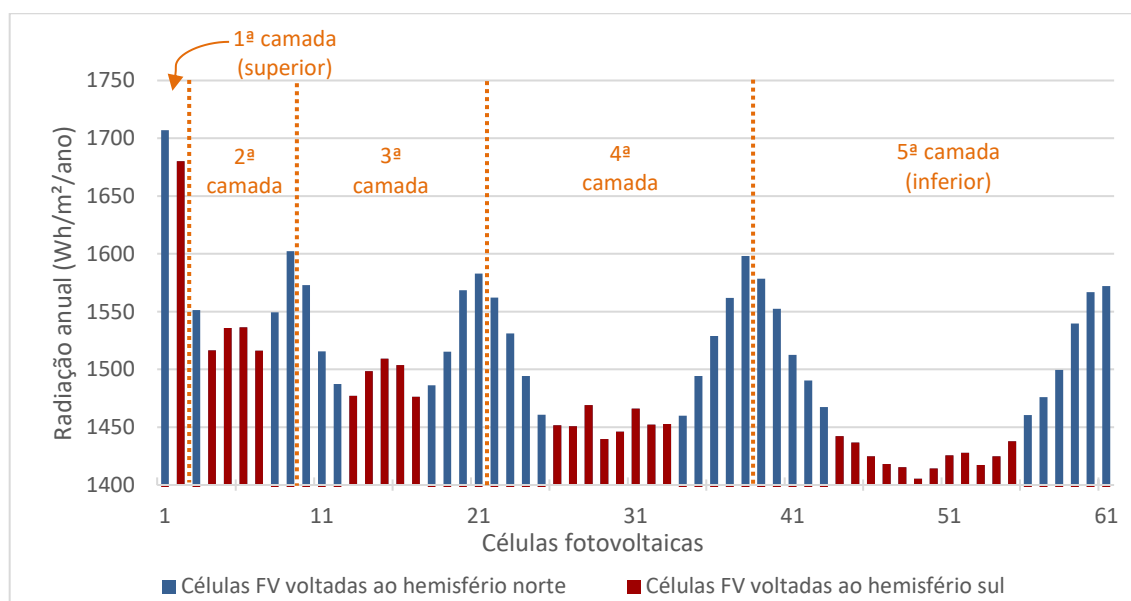
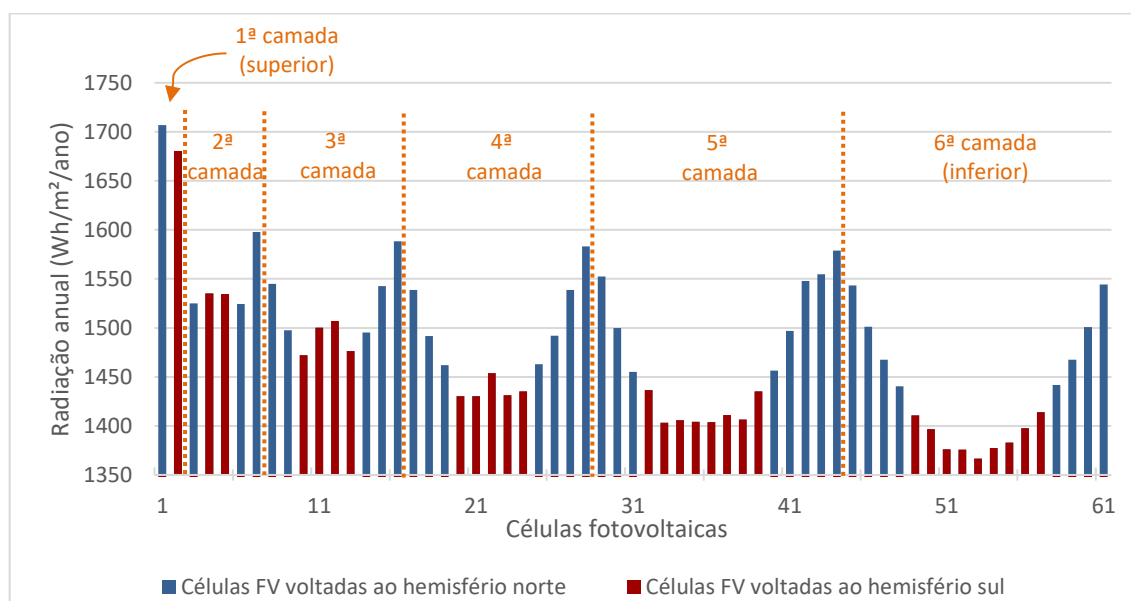


Figura 3.15 - Radiação solar anual para as células da árvore M2_61C_6, em Viçosa – MG



Analisando os gráficos das Figuras 3.14 e 3.15 foi possível constatar o perfil de radiação incidente nas células FV para cada camada. Observou-se que as duas primeiras células FV, localizadas na primeira camada, foram as que mais receberam radiação solar ao longo do ano. Em todas as camadas, notou-se valores mais altos de radiação para células FV que tendem ao norte, e valores mais baixos para as

células que tendem ao sul. Além disso, quanto mais baixa é a camada, maior é a redução da radiação incidente nas células FV devido ao sombreamento gerado pelas outras das camadas acima.

A Tabela 3.11 exibe os valores de radiação anual total por árvore e radiação média anual por célula FV nas simulações do modelo M2 para a cidade de Viçosa – MG. Ao se comparar as árvores do modelo M2 com o mesmo número de células FV, notou-se que todas as árvores com 5 camadas tinham menores perdas por sombreamento, e conseqüentemente, possuíam maiores valores de radiação anual total e radiação média anual por célula FV. A maior perda por sombreamento na cidade de Viçosa – MG ocorreu para o caso M2_61C_6, sendo de 10,89%.

Ao se comparar a radiação média anual por célula FV de uma árvore do modelo M2 com a radiação incidente em uma célula FV com orientação otimizada, para Viçosa – MG ($\beta=|\phi|$ e $\gamma=180^\circ$), constatou-se a menor redução, de 8,96%, para o caso M2_16C_5, e a maior redução, de 13,25%, para o caso M2_61C_6.

Tabela 3.11 - Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores do modelo M2 para a cidade de Viçosa - MG

Árvore	Radiação anual total (kWh/m ² /ano)	Perda por sombreamento (%)	Radiação média anual por célula FV (Wh/m ² /ano)	Redução da radiação média anual por célula FV (%) *
M2_16C_5	24,87	6,64	1554,12	8,96
M2_16C_6	24,83	7,03	1551,67	9,10
M2_21C_5	32,40	7,27	1543,08	9,60
M2_21C_6	32,24	7,72	1535,37	10,05
M2_25C_5	38,42	7,62	1536,76	9,97
M2_25C_6	38,17	8,22	1526,76	10,56
M2_31C_5	47,39	8,08	1528,67	10,45
M2_31C_6	46,99	8,84	1515,99	11,19
M2_41C_5	62,20	8,77	1516,96	11,13
M2_41C_6	61,57	9,66	1501,79	12,02
M2_61C_5	91,51	9,74	1500,26	12,11
M2_61C_6	90,33	10,89	1480,86	13,25

* Redução da radiação média anual por célula FV da árvore em relação a radiação anual em uma célula FV com inclinação otimizada (no caso de Viçosa – MG, $\beta=|\phi|$ e $\gamma=180^\circ$).

Os valores referentes às outras duas cidades encontram-se nas Tabelas A13 e A14 do Apêndice A. De maneira análoga, também foi constatado que todas as árvores com 5 camadas das cidades de Boa Vista – RR e Chuí – RS tiveram menores perdas por sombreamento, e conseqüentemente, possuíam maiores valores de radiação anual total e radiação média anual por célula FV. Assim, verificou-se que, seguindo a metodologia proposta, quanto mais camadas se tem na árvore, maiores são as perdas por sombreamento. O caso M2_61C_6 também obteve a maior perda por sombreamento nas duas cidades, sendo de 11,29% para Boa Vista – RR e 9,04% para Chuí – RS. Com esses resultados, concluiu-se que o modelo M2 teve menores perdas por sombreamento em cidades com latitudes (em módulo) maiores.

A Tabela 3.12 exhibe a área ocupada por cada árvore do modelo M2, calculada de acordo com a Equação 3.31, bem como o número de células FV equivalentes, com orientação otimizada de cada cidade que, somando sua área projetada, resultam na mesma área ocupada por essas árvores. Verificou-se que as árvores com 6 camadas ocupam uma área menor, quando comparadas às árvores com o mesmo número de células FV e 5 camadas.

Tabela 3.12 - Área ocupada pelas árvores do modelo M2 e o número de células FV equivalentes, com orientação otimizada, que resultam na mesma área

Árvore	Número de células equivalentes correspondente a área ocupada pela árvore			
	Área (cm ²)	Viçosa – MG	Boa Vista – RR	Chuí – RS
M2_16C_5	138,1	15,51	14,50	17,46
M2_16C_6	127,3	14,29	13,36	16,09
M2_21C_5	167,8	18,84	17,61	21,22
M2_21C_6	143,7	16,13	15,08	18,17
M2_25C_5	185,8	20,86	19,50	23,49
M2_25C_6	163,4	18,35	17,16	20,67
M2_31C_5	224,5	25,21	23,56	28,38
M2_31C_6	185,8	20,86	19,50	23,49
M2_41C_5	289,4	32,49	30,38	36,59
M2_41C_6	239,1	26,84	25,09	30,23
M2_61C_5	445,5	50,02	46,77	56,33
M2_61C_6	353,3	39,67	37,09	44,67

Foi calculado o ganho de radiação solar incidente em uma árvore do modelo M2 quando comparada à radiação solar incidente em um sistema FV de mesma área projetada, com orientação otimizada. Os ganhos foram dispostos na Tabela 3.13. Observou-se que, para a cidade de Viçosa, a árvore M2_16C_5 possui um ganho com valor negativo, representando que, do ponto de vista de radiação solar incidente, seria mais interessante instalar o equivalente a “15,51” células FV com orientação otimizada do que instalar uma árvore do modelo M2 com 16 células e 5 camadas. Para a cidade de Boa Vista – RR, todos os casos do modelo M2 tiveram ganhos positivos. Já para a cidade de Chuí – RS, apenas metade dos casos para o modelo M2 tiveram um ganho positivo.

Tabela 3.13 - Ganho de radiação solar por área projetada para árvores do modelo M2 em relação ao sistema FV de mesma área com orientação otimizada

Árvore	Ganho de radiação solar devido a área ocupada (%)		
	Viçosa – MG	Boa Vista – RR	Chuí – RS
M2_16C_5	-6,05	4,13	-15,32
M2_16C_6	1,78	12,26	-8,20
M2_21C_5	0,76	11,67	-8,98
M2_21C_6	17,09	29,33	5,56
M2_25C_5	7,90	19,40	-2,74
M2_25C_6	21,84	34,58	9,69
M2_31C_5	10,14	21,91	-0,77
M2_31C_6	31,98	45,31	18,78
M2_41C_5	12,13	23,82	1,05
M2_41C_6	34,38	48,16	20,92
M2_61C_5	7,17	18,58	-3,36
M2_61C_6	33,40	45,72	20,16

Em todas as três cidades foi observado que a árvore do modelo M2 que obteve o maior ganho de radiação solar por área ocupada foi a M2_41C_6, com 41 células e 6 camadas. Isto é, constatou-se que, aumentando o número de células FV para 61, não se aumentou o ganho de radiação solar incidente por área, diferentemente das árvores do modelo M1.

Além disso, ao analisar a árvore M2_41C_6 para Viçosa – MG, constatou-se um aumento de aproximadamente 52,76% no número de células FV para um ganho de radiação por área de 34,38%. Assim, a razão entre o aumento do número de células FV e o ganho de radiação por área foi de 1,53. Isto é, para este caso, a captação da radiação solar pela árvore em relação à um sistema FV com orientação otimizada, com a mesma área projetada, seria cerca de 53% mais cara, desconsiderando outros custos adicionais que possam existir com o aumento do número de geradores fotovoltaicos.

Por fim, foram realizadas as simulações com dados horários para os modelos com 16 e 61 células FV para a cidade de Viçosa – MG. Foi observado que a primeira célula FV de cada caso analisado manteve sua orientação otimizada com $\beta=21^\circ$ e $\gamma=180^\circ$, assim como os resultados para a simulação com os dados médios mensais. Estes ângulos correspondem aos valores encontrados para o caso testemunho com orientação otimizada. As demais células FV obtiveram valores de β próximos aos valores encontrados na simulação com dados médios mensais da radiação solar diária, variando em até 5° .

A Tabela 3.14 exibe a radiação solar anual em cada um dos casos analisados. Notou-se que, para todos os casos, os valores de radiação encontrados para a simulação com dados horários foram menores que os encontrados com base nos dados médios mensais. Essas variações podem ter ocorrido devido a utilização de diferentes bancos de dados de radiação solar. Comparando os resultados de simulação horária com os de simulação com dados médios mensais de radiação (Tabelas 3.14, 3.7 e 3.11), percebeu-se que a redução mínima de radiação anual total ocorreu para o caso M2_16C_5, com 3,58%, passando de 24,87 para 23,98 kWh/m²/ano, e a redução máxima foi para o caso M1_61C, com cerca de 5,13%, de 84,53 para 80,19 kWh/m²/ano. Também foram observadas reduções para a perda por sombreamento e para a radiação média anual por célula FV. A redução da radiação média anual por célula FV da árvore em relação a radiação anual em uma célula FV com orientação otimizada obteve valores menores para todos os casos, exceto para o M1_61C que aumentou de 18,82% para 19,09%.

Tabela 3.14 - Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores para a cidade de Viçosa – MG, com base na simulação com dados horários

Árvore	Radiação anual total (kWh/m ² /ano)	Perda por sombreamento (%)	Radiação média anual por célula FV (Wh/m ² /ano)	Redução da radiação média anual por célula FV (%) *
M1_16C	23,45	7,44	1465,97	9,77
M1_61C	80,19	16,99	1314,64	19,09
M2_16C_5	23,98	5,50	1498,88	7,75
M2_16C_6	23,90	6,00	1494,26	8,03
M2_61C_5	87,63	9,28	1436,70	11,58
M2_61C_6	86,12	10,83	1411,98	13,10

* Redução da radiação média anual por célula FV da árvore em relação a radiação anual de uma célula FV com inclinação otimizada (no caso de Viçosa – MG, $\beta=|\phi|$ e $\gamma=180^\circ$).

No mais, foi calculado o ganho de radiação solar incidente nas árvores quando comparada à radiação solar incidente em um sistema FV de mesma área projetada, com orientação otimizada, como pode ser visualizado na Tabela 3.15. Constatou-se que o caso M2_16C_5 continuou com um ganho negativo, se mostrando inviável do ponto de vista de radiação solar incidente. Os demais ganhos obtiveram valores bem próximos aos encontrados na simulação com dados médios mensais.

Tabela 3.15 - Ganho de radiação solar por área projetada do protótipo simulado das árvores solares em relação ao sistema FV testemunho de mesma área, para Viçosa – MG

Árvore solar	M1_16C	M1_61C	M2_16C_5	M2_16C_6	M2_61C_5	M2_61C_6
Ganho (%)	9,99	276,04	-4,80	2,97	7,82	33,63

A realização de simulações da radiação incidente nos casos estudados utilizando dados de radiação horários implicaram em aumento exponencial do tempo computacional. Porém, os resultados destas simulações foram diferentes no máximo, como explicitado, em cerca de 5,13%. Assim, acredita-se que para muitas aplicações possa ser viável a utilização de dados médios mensais de radiação solar para as simulações de comportamento anual.

No modelo de árvore solar desenvolvido por Dey e Pesala (2020) foi obtido apenas 0,17% de perda anual de energia devido ao sombreamento. Entretanto, a árvore projetada ocupou uma área de cerca de 67% maior do que a soma das áreas de cada gerador FV. Assim como nos estudos de Gangwar et al. (2018), Singh, Rawat e Srivastava (2019), Srisai e Harnsoongnoen (2019) e Gupta (2017), não foi encontrado na literatura pesquisas que visassem a otimização de ganho de energia por área, isto é, maximização da geração de energia elétrica por área ocupada.

3.5. Conclusão

Neste trabalho foi determinada, por meio de simulação, a orientação ótima de geradores fotovoltaicos que constituem uma árvore solar fotovoltaica. Ao analisar o primeiro gerador fotovoltaico de cada árvore, otimizado tanto pelo ângulo de inclinação quanto pelo ângulo de azimute, foi possível constatar que o ângulo de inclinação ótimo nem sempre é igual ao módulo da latitude. Considerando as três cidades estudadas, Viçosa, MG, Boa Vista, RR e Chuí, RS, notou-se uma variação de até 8° entre o ângulo de inclinação ótimo e a latitude. Já o ângulo de azimute ótimo foi de 180°, ou seja, voltado ao norte, para os geradores fotovoltaicos localizados no hemisfério sul, e de 0° para os geradores do hemisfério norte.

Ao simular a radiação solar incidente em dois modelos de árvore solar, sendo eles, espiralada e conífera, foi observado que, de modo geral, as perdas por sombreamento são maiores nas árvores do modelo espiralada. Isto pode ser justificado pois todas as células fotovoltaicas foram posicionadas diretamente ao tronco e não afastadas por camadas como no modelo das coníferas. Entretanto, devido às áreas projetadas pelas árvores do modelo das coníferas terem sido maiores, constatou-se maiores ganhos de radiação solar incidente por área projetada para as árvores do modelo espiralada. Isto indica que o modelo de árvore denominado espiralada tende a ser melhor quando o objetivo é maximizar o ganho de radiação solar por área projetada, enquanto o modelo de árvore conífera tende a se destacar quando o objetivo é reduzir as perdas por sombreamento e, conseqüentemente, receber maiores valores de radiação solar nas células fotovoltaicas.

Concluiu-se que a cidade com a menor latitude, Boa Vista – RR, foi a que apresentou a maior perda por sombreamento nos dois modelos empregados. Entretanto, a mesma cidade obteve o maior ganho de radiação solar por área

projetada. Isso mostra que, apesar de se alcançar um maior ganho de radiação por área, deve-se atentar para as possíveis sombras geradas e, conseqüentemente, para a atenuação da radiação em cada célula FV, uma vez que o sombreamento pode reduzir drasticamente a geração de energia elétrica e até mesmo danificar os geradores fotovoltaicos.

Foi demonstrado que, em termos de radiação anual total, as simulações com dados horários se diferiram dos resultados com dados médios mensais em cerca de, no máximo, 5,13% nos casos analisados para Viçosa – MG, apesar do tempo de simulação aumentar consideravelmente. Essa diferença pode não ser significativa para muitas situações e a utilização de dados médios mensais de radiação solar para as simulações de comportamento anual pode se tornar viável devido a otimização do tempo de execução.

Além disso, notou-se que não foram encontrados na literatura resultados semelhantes aos encontrados neste estudo com o intuito de otimizar a radiação solar de uma árvore solar fotovoltaica por área ocupada para diferentes latitudes e modelos, como a espiralada e a conífera. Assim, confirmou-se a necessidade do desenvolvimento de novas pesquisas neste tema.

Uma possível aplicação deste estudo pode ser ao instalar árvores solares fotovoltaicas em locais que se vise a independência energética utilizando uma pequena área disponível, e não necessariamente a minimização do valor da energia gerada.

Deve-se ressaltar que, neste estudo, foram calculadas somente as perdas por sombreamento proveniente entre células fotovoltaicas. Não foi considerado o sombreamento proveniente do tronco e galhos da árvore solar ou de qualquer outro objeto externo que pudesse gerar atenuação da radiação solar incidente.

3.6. Referências bibliográficas

ABDALLAH, R.; JUAIDI, A.; ABDEL-FATTAH, S.; AGUGLIARO, F. M. Estimating the optimum tilt angles for south-facing surfaces in Palestine. **Energies**, Palestine, v. 13, n. 623, p. 1-29. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13030623>. Acesso em: 23 jul. 2021.

BAHADUR, B.; KRISHNAMURTHY, K. V.; GHOSE, M.; ADAMS, S. J. **Asymmetry in plants - Biology of handedness**. 1^a. ed.: Taylor & Francis Group, 2019.

COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. The average distribution of solar radiation - correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. **Solar Energy**, v. 2, p. 155 - 164, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90100-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90100-2). Acesso em: 09 jun. 2021.

DEY, S.; LAKSHMANAN, M. K.; PESALA, B. Optimal solar tree design for increased flexibility in seasonal energy. **Renewable Energy**, India, n. 125, p. 1038-1048, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.017>. Acesso em: 16 abr. 2021.

DEY, S.; LAKSHMANAN, M. K.; PESALA, B. Tuning the solar power generation curve by optimal design of solar tree orientations. **Advances in Energy Research**. India, v. 1, p. 461-469, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2666-4_45. Acesso em: 15 ago. 2021.

DEY, S.; PESALA, B. Solar tree design framework for maximized power generation with minimized structural cost. **Renewable Energy**, p. 1-30, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.035>. Acesso em: 16 abr. 2021.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind**. 5th. ed. Wiley, 2020.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly - average global radiation. **Solar Energy**, v. 28, p. 293-302, 1982. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(82\)90302-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(82)90302-4). Acesso em: 17 mai. 2021.

GANGWAR, P.; SINGH, R.; TRIPATHI, R. P.; SINGH, A. K. Effective solar power harnessing using a few novel solar tree designs and their performance assessment. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental**. p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549162>. Acesso em: 03 mar. 2021.

GARDASHOV, R.; EMINOV, M.; KARA, G.; KARA, E. G. E.; MAMMADOV, T.; HUSEYNOVA, X. The optimum daily direction of solar panels in the highlands, derived by an analytical method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Baku, Azerbaijan, v. 120, p. 1-11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109668>. Acesso em: 29 jun. 2021.

GUPTA, S. Quantum solar tree-design and production for domestic applications and future trends. **International Journal of Applied Research**, v. 3, p. 439-444, 2017. Disponível em: <https://www.allresearchjournal.com/archives/?year=2017&vol=3&issue=3&part=G&ArticleId=3400>. Acesso em: 22 ago. 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Arquivos climáticos INMET 2016. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>. Acesso em: 10 jun. 2021.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Toronto, Canada: **Academic Press**, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373750-2.X5001-0>. Acesso em: 20 jul. 2021.

JAIN, D.; LALWANI, M. A review on optimal inclination angles for solar arrays. **International Journal of Renewable Energy Research**, Kota, Bharat, v. 7, n. 3, p. 1-9, 2017. Disponível em: <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/5833/0>. Acesso em: 22 ago. 2021.

KALLIOĞLU, M. A.; DURMUS, A.; KARAKAYA, H.; YILMAZ, A. Empirical calculation of the optimal tilt angle for solar collectors in northern hemisphere. **Energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects**, Turkey, p. 1-24, August 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1663315>. Acesso em: 10 set. 2021.

KASTEN, F.; YOUNG, A. T. Revised optical air mass tables and approximation formula. **Applied Optics**, v. 28, p. 1-4, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1364/AO.28.004735>. Acesso em: 09 set. 2021.

KIM, G. Y.; HAN, D. S.; LEE, Z. Solar panel tilt angle optimization using machine learning model: a case study of Daegu city, South Korea. **Energies**, South Korea, v. 13, n. 529, p. 1-13, January 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13030529>. Acesso em: 10 ago. 2021.

MARTÍN, C. N.; MARTÍN, D. S.; SÁNCHEZ, M. C.; LEMON, S. A global annual optimum tilt angle model for photovoltaic generation to use in the absence of local meteorological data. **Renewable Energy**, Spain, v. 161, p. 722-735, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.098>. Acesso em: 15 jul. 2021.

OLIVEIRA JR., M. M. **Avaliação por simulação de projetos para sistemas fotovoltaicos**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. (Dissertação), p. 95. 2015. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/7328/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2021.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE: 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 05 mai. 2021.

PEREZ, R.; STEWART, R.; SEALS, R.; GUERTIN, T. The development and verification of the Perez Diffuse Radiation Model. Albany, p. 1-176. 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.2172/7024029>. Acesso em: 15 jun. 2021.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; J., MICHALSKY; R., STEWART. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, p. 271-289, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H). Acesso em: 15 jun. 2021.

SANTOS, I. P.; RÜTHER, R. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. **Renewable Energy**, v. 63, p. 116-124, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.008>. Acesso em: 19 jun. 2021.

SINGH, R.; RAWAT, N.; SRIVASTAVA, R. Performance evaluation of a solar tree design and a fixed solar panel for effective solar power harnessing. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 14, n. 11, p. 2616-2621, 2019. Disponível em: https://www.ripublication.com/ijaer19/ijaerv14n11_13.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search**, v. 2, p. 172, 1971.

SRISAI, S.; HARNSOONGNOEN, S. Efficiency of solar tree based on golden ratio. **Journal os Physics: Conference Series**, n. 1380, p. 1-4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012025>. Acesso em: 27 mai. 2021.

ULLAH, A.; IMRAN, H.; MAQSOOD, Z.; BUTT, N. Z. Investigation of optimal tilt angles and effects of soiling production in Pakistan. **Renewable Energy**, n. 139, p. 830-843, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.114>. Acesso em: 23 ago. 2021.

XU, R.; NI, K.; HU, Y.; SI, J.; WEN, H.; YU, D. Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. **Energy Conversion and Management**, China, v. 148, p. 100-109, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.058>. Acesso em: 18 ago. 2021.

4. DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS DE ÁRVORES SOLARES FOTOVOLTAICAS

4.1. Resumo

A utilização da energia solar fotovoltaica vem se popularizando mundialmente nos últimos anos. Entretanto, para se instalar um sistema fotovoltaico plano e fixo, é necessária uma área significativa livre de sombreamento. Uma possível solução para a instalação de um sistema fotovoltaico utilizando uma menor área pode ser encontrada no uso de árvore solar fotovoltaica. A árvore solar fotovoltaica é inspirada em uma árvore natural, em que os geradores fotovoltaicos são posicionados em uma estrutura vertical/tronco, em semelhança às folhas. Neste trabalho foram projetados e construídos quatro protótipos de sistemas fotovoltaicos, sendo três em formato de árvore solar e um em formato tradicional tendo orientação fixa otimizada. Entre os protótipos de árvores solares desenvolvidos, um foi construído de acordo com uma árvore do tipo conífera, em que o comprimento dos galhos aumentava a cada camada da árvore, tornando o diâmetro de uma dada camada sempre maior do que o diâmetro da camada imediatamente acima. Os outros dois protótipos de árvore foram construídos com diferentes números de células, seguindo o modelo de árvore com filotaxia espiralada, em que as folhas são dispostas no tronco formando uma espiral. Os protótipos foram instalados na cobertura do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, e os experimentos ocorreram durante sete dias. Foi observado que, dentre os protótipos de árvores desenvolvidos, o modelo de árvore conífera foi o que obteve maiores valores de geração de energia elétrica estimada durante o experimento. Quando analisada a geração de energia elétrica estimada por área ocupada, foi concluído que o protótipo de árvore do modelo espiralada com maior número de células FV foi o mais vantajoso. Entretanto, ao se comparar os protótipos de árvores solares com o do sistema tradicional, foi verificado que, este último foi o mais eficiente na geração de energia elétrica estimada por célula FV. Comparando os resultados da simulação com os dos experimentos, percebeu-se que pode haver uma tendência de alguns modelos de árvores serem mais eficientes do que os sistemas planos fixos.

Palavras-chave: energia renovável, validação, sombreamento, radiação solar, uso múltiplo de sistemas fotovoltaicos.

4.2. Introdução

A crise energética mundial tem incentivado o desenvolvimento de tecnologias e pesquisas relacionadas às fontes renováveis de geração de energia. Os estudos nesta área visam aumentar a eficiência da conversão de energia por meio de alternativas que contribuam com a melhoria do sistema como um todo e que causem menos impactos ao meio ambiente (RAM et al., 2018; RODRIGUES et al., 2019).

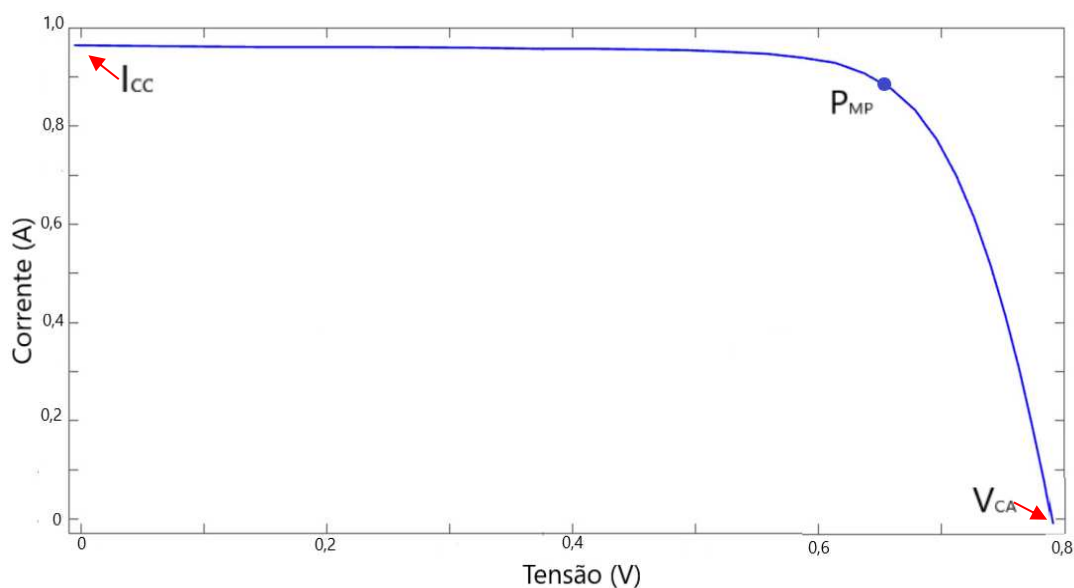
Uma nova possibilidade para a geração de energia solar fotovoltaica é a árvore solar. Acredita-se que com a árvore solar seja possível aumentar a geração de energia elétrica em uma área reduzida, se comparado com sistemas fotovoltaicos tradicionais, com instalação fixa na horizontal. Isto é, pode-se tornar aplicável a instalação de árvores solares em locais com área disponível restrita, como é o caso de coberturas de alguns edifícios. Além disso, árvores solares podem apresentar uma estética mais agradável e possibilitar o uso múltiplo do local, podendo conciliar, por exemplo, a geração de energia elétrica com a produção agrícola em um mesmo terreno (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018; GANGWAR et al., 2018).

Para projetar uma árvore solar é necessário determinar os ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) de cada gerador fotovoltaico (FV) que a compõem, de modo a maximizar a sua eficiência (DEY; LAKSHMANAN; PESALA, 2020). Também deve-se atentar às possíveis sombras nas superfícies dos geradores FV, pois podem ocasionar em uma redução significativa na geração de energia elétrica (MOCHIZUKI; YACHI, 2017; VIEIRA et al., 2020).

Quando a radiação solar que incide em um gerador FV é reduzida devido a nuvens, poeira ou até mesmo algo que possa sombrear parcialmente sua superfície, sua corrente também é reduzida. O efeito dessa diminuição se propaga, limitando a corrente de todos os geradores FV conectados em série com ele e provocando uma queda na geração de todo o conjunto (VIEIRA et al., 2020). Além disso, pode surgir um “ponto quente” (do inglês, “*hotspot*”) no gerador FV sombreado, uma vez que a energia gerada que não está sendo disponibilizada ao consumo é dissipada no local afetado. Esse ponto quente aumenta a temperatura do gerador FV, podendo danificá-lo com rupturas e fusões dos materiais (RAM et al., 2018; ZHANG et al., 2019).

Assim, fatores como a radiação solar incidente e a temperatura podem alterar o desempenho de um gerador FV (SWARAJ; MOHAPATRA; SAHOO, 2016). Este, por sua vez, pode ter seu comportamento caracterizado pela curva I-V, que permite identificar o desempenho de uma célula FV por meio da relação entre a corrente elétrica e a diferença de potencial gerada (ARAÚJO; LOPES; MOREIRA, 2020). Na Figura 4.1 é ilustrada a resposta característica de uma célula FV de silício submetida às condições padrões de teste (*Standard Test Conditions - STC*, com 1000 W/m^2 , temperatura da célula de 25°C e massa de ar - AM 1,5). Por meio desta curva é possível identificar alguns parâmetros elétricos como a tensão de circuito aberto (V_{CA}), corrente de curto-circuito (I_{CC}) e o ponto de máxima potência (P_{MP}) (PINHO; GALDINO, 2014; AYALA-MATÓ et al. 2017).

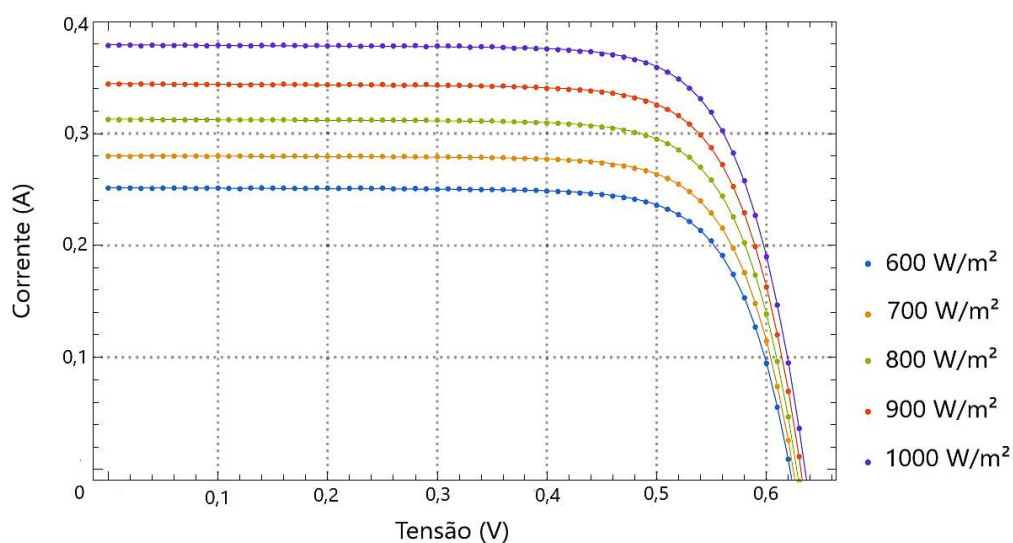
Figura 4.1 - Curva característica I-V de uma célula fotovoltaica



Fonte: Ayala-Mató et al. (2017).

A redução da radiação em um gerador FV leva a uma diminuição da corrente de curto-circuito e a uma atenuação relativamente pequena na tensão de saída, como pode ser visualizado na Figura 4.2. Observa-se que a corrente de curto-circuito se altera proporcionalmente à radiação solar (FÉBBA et al., 2018).

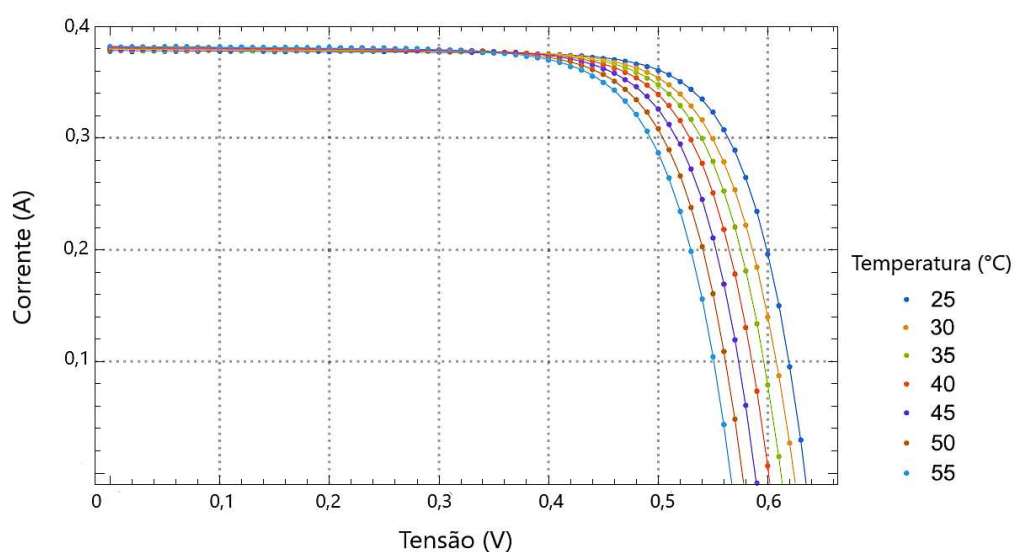
Figura 4.2 - Curva I-V de um gerador FV de silício policristalino submetido à temperatura constante de 25°C e diferentes condições de radiação solar



Fonte: Fébba et al. (2018).

Já o aumento da temperatura provoca uma redução na tensão de saída, entretanto a corrente de curto-circuito sofre uma variação relativamente pequena, como mostrado na Figura 4.3 (FÉBBA et al., 2018; ADEEB; FARHAN; AL-SALAYMEH, 2019)

Figura 4.3 - Curva I-V de um gerador FV de silício policristalino submetido à 1000 W/m² e diferentes condições de temperatura



Fonte: Fébba et al. (2018).

Desta forma, para projetar uma árvore solar fotovoltaica deve-se atentar para fatores como: a redução da radiação incidente devido ao sombreamento, aumento de temperatura, posicionamento e orientação espacial dos geradores FV e esquema de conexão elétrica entre os geradores FV.

Assim, este trabalho teve como objetivo construir e validar protótipos de árvore solar a partir de modelos simulados para a cidade de Viçosa – MG, conforme descrito no Capítulo 3. Foram desenvolvidos, projetados e construídos quatro protótipos, sendo eles: três árvores solares baseadas nos modelos espiralada (dois protótipos) e conífera (um protótipo), e um protótipo de um sistema FV tradicional, com orientação fixa otimizada, que serviu de testemunha para efeito de comparação.

4.3. Material e métodos

Os testes e experimentos desenvolvidos neste trabalho foram realizados no Laboratório de Energia e na cobertura do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Inicialmente, foram realizados testes para verificar a padronização das células FV. Esses testes foram executados de modo a não se utilizar células FV defeituosas e nem células que possuísem curvas de resposta significativamente distintas entre si, a fim de não comprometer os resultados experimentais dos protótipos.

Posteriormente, os protótipos foram construídos seguindo os resultados de simulação para a orientação de cada célula FV dos modelos de árvores, obtidos no Capítulo 3. Ao todo, foram construídos quatro protótipos, sendo: dois protótipos de árvore solar do modelo espiralada, um com 16 células FV e o outro com 31 células FV; um protótipo de árvore solar do modelo conífera com 31 células FV e 6 camadas; e um protótipo de um sistema FV tradicional, com orientação fixa otimizada. A escolha dos protótipos de árvore solar do modelo espiralada com 16 e 31 células se deu com o intuito de se comparar com os resultados obtidos por Pinto (2018), que também desenvolveu e construiu protótipos de árvores solares espiraladas, porém com 16 e 30 células FV. Já o protótipo do modelo conífera de 31 células e o protótipo de sistema FV tradicional com orientação fixa otimizada foram construídos por serem modelos diferentes da espiralada e, também, servirem de comparação.

Por fim, durante a etapa experimental, os protótipos foram expostos simultaneamente à radiação solar, sob as mesmas condições ambientes.

4.3.1. Teste de integridade das células fotovoltaicas

Foram realizados ensaios em 105 células FV visando verificar o bom funcionamento de cada uma. Na superfície das células tinha uma camada de resina epóxi com uma capa antirreflexo, que serviam como proteção e minimizavam as perdas por reflexão. As células FV de silício possuíam dimensões de 53 x 18 x 2,5 mm, com tensão de máxima potência (V_{MP}) de 500 mV, corrente de máxima potência (I_{MP}) de 100 mA e potência nominal de 50 mW, segundo dados do fabricante (SUNYIMA, 2021). A curva característica I-V e outros parâmetros elétricos das células FV não foram fornecidos pelo fabricante. Desta forma, para se estimar a corrente de curto-circuito (I_{CC}) das células FV, foram levantadas as especificações técnicas de trinta geradores fotovoltaicos de diferentes marcas como *CanadianSolar*, *Mitsubishi Electric*, *Sunceco*, *Risen* e *BLD Solar*, de modo a relacionar, por meio de regra de três simples, a média da corrente de curto-circuito com a média da corrente de máxima potência (I_{MP}) fornecida pelos fabricantes. De posse deste valor e da corrente de máxima potência das células FV utilizadas nos experimentos, estimou-se a corrente de curto-circuito destas células FV.

Os ensaios das células FV foram realizados visando certificar que todas possuíam respostas semelhantes quando submetidas às mesmas condições de temperatura e radiação. Para isso, inicialmente, realizou-se uma inspeção visual para verificar a inexistência de imperfeições na estrutura física de cada célula. Em seguida, realizou-se o levantamento das curvas características I-V. Ao finalizar as medições, foram calculados valores médios para a curva I-V, e as células que apresentaram valores fora do intervalo de $\pm 10\%$ das médias foram descartadas.

Desse modo, os ensaios foram realizados em um ambiente com luminosidade controlada, submetendo as células FV individualmente à radiação gerada por uma lâmpada fluorescente compacta de 25 W. Todas as células FV foram situadas a uma mesma distância de 35 cm da fonte luminosa, sendo assim, expostas ao mesmo nível de radiação. Para a medição da radiação fornecida pela lâmpada, utilizou-se um piranômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CMP6, com sensibilidade de $14,61 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$, exibido na Figura 4.4 (KIPP & ZONEN, 2021).

Figura 4.4 - Piranômetro da marca Kipp & Zonen, modelo CMP6, utilizado durante os experimentos



Fonte: Kipp & Zonen (2021).

Para controlar a temperatura durante os ensaios, realizaram-se os testes em ambiente climatizado, mantendo o monitoramento e controle da temperatura das células FV no intervalo de $24 \pm 0,5$ °C a $26 \pm 0,5$ °C durante todo o experimento. Devido às características construtivas da lâmpada, havia uma tendência da temperatura se elevar ao decorrer dos testes. Ao se atingir valores fora do intervalo estipulado, os testes eram interrompidos até que as condições de temperatura predefinidas fossem restabelecidas.

O monitoramento da temperatura se deu por meio do sensor LM35, que fornece uma tensão de saída linearmente proporcional à temperatura medida. Cada 10 mV na saída equivalem a 1°C. A alimentação do sensor foi realizada com 5 V pela plataforma Arduino Mega 2560. A Tabela 4.1 apresenta as especificações técnicas do sensor LM35 (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

Tabela 4.1 - Especificações técnicas do sensor LM35

Modelo	LM35
Tensão de alimentação	4 - 30 V
Unidade de medição	°C
Fator de escala	10 mV/°C
Intervalo de resposta	-55°C à 150°C
Precisão	0,5 °C
Consumo máximo de corrente	60 µA

Fonte: Texas Instruments (2017).

A aquisição de dados durante os testes foi realizada por meio de um Arduino MEGA 2560, que é uma placa de microcontrolador baseada no ATMEGA2560. A placa possui 54 pinos digitais, 16 entradas analógicas, 4 portas seriais e pode ser visualizada na Figura 4.5. As especificações técnicas do Arduino MEGA 2560 são mostradas na Tabela 4.2 (ARDUINO, 2018).

Figura 4.5 - Vista da placa do Arduino modelo MEGA 2560



Fonte: Arduino (2018).

Tabela 4.2 - Especificações técnicas da placa Arduino MEGA 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Tensão operacional	5 V
Tensão de entrada (recomendado)	7 - 12 V
Portas digitais	54
Portas analógicas	16
Corrente por pino de I/O	20 mA
Corrente por pino de 3,3 V	50 mA
Memória <i>flash</i>	256 kB
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Velocidade <i>Clock</i>	16 MHz
Comprimento	101,52 mm
Largura	53,3 mm
Massa	37 g

Fonte: Arduino (2018).

Para a aquisição dos dados, realizou-se alguns testes iniciais com a finalidade de encontrar alguns pontos de operação, dado que a temperatura e radiação são variáveis externas que causam deslocamento da curva característica da célula FV. Foram realizados testes com resistores no intervalo de $2\ \Omega$ até $2\ \text{k}\Omega$, representando as cargas elétricas. Foi verificado que, variando a carga em parte deste intervalo, entre $40\ \Omega$ a $1\ \text{k}\Omega$, e mantendo condições controladas de temperatura e radiação, era possível esboçar as curvas características I-V para as condições dos testes.

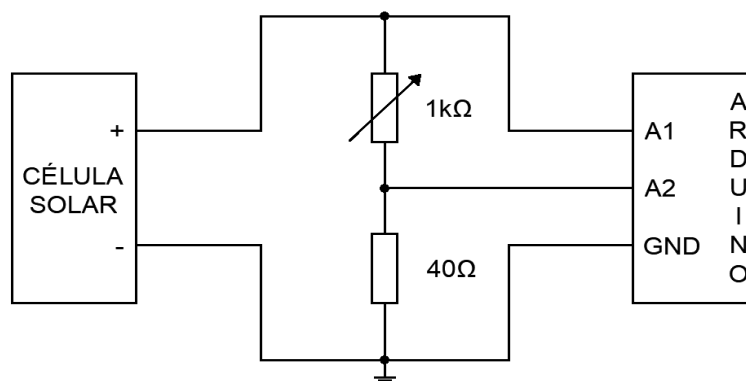
Dessa forma, para a realização destes testes, fez-se necessário a utilização dos materiais listados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Lista do material utilizado para teste de integridade das células FV

Quantidade	Descrição
1	Protoboard
1	Potenciômetro linear de $1\ \text{k}\Omega$
4	Resistores de $10\ \Omega$
1	Placa Arduino Mega 2560
1	Sensor de temperatura LM35
1	Piranômetro
1	Multímetro digital

A aquisição de dados foi feita utilizando o princípio de divisão de tensão. Realizou-se a montagem do circuito de teste conforme apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Circuito empregado na aquisição de dados de tensão e corrente para realização de teste de integridade das células FV



Dessa maneira, conectando os quatro resistores de 10 Ω em série, totalizando 40 Ω , e o potenciômetro de 1 k Ω , foi possível obter uma carga entre os terminais da célula que variava entre 40 Ω e 1040 Ω . Assim, utilizou-se uma porta de entrada analógica A1 para medir a tensão sobre a carga total e a porta analógica A2 para medir a tensão sobre a associação de resistores com 40 Ω . Em posse da tensão em A2, foi possível calcular a corrente gerada por meio da Primeira Lei de Ohm, Equação 4.1 (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$I = \frac{V_{A2}}{R} \quad (4.1)$$

em que,

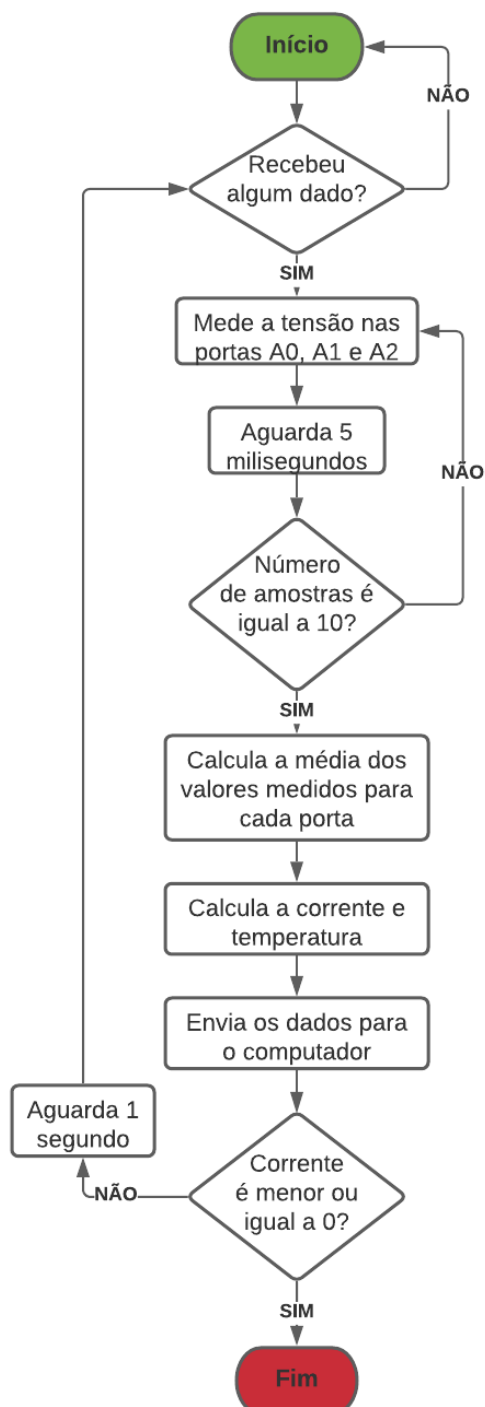
V_{A2} – Tensão na entrada analógica A2, V; e

R – Resistência equivalente, 40 Ω .

A porta A0 foi utilizada para conectar o sensor de temperatura. Dessa forma, repetiu-se esse ensaio para todas as células, sendo que para cada uma coletou-se pontos de operação da curva variando o potenciômetro. Simultaneamente, os dados eram armazenados em uma planilha e a curva I-V de cada célula foi esboçada.

Para ilustrar o algoritmo utilizado na placa Arduino, estruturou-se o fluxograma apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Fluxograma do código de aquisição de dados utilizado durante os testes de integridade das células FV



4.3.2. Construção dos protótipos

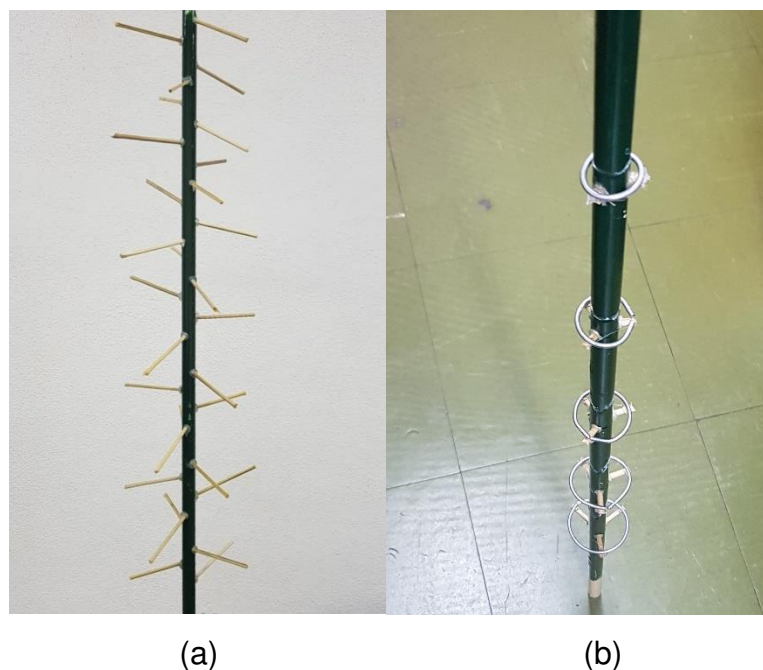
Os 3 modelos para a construção dos protótipos de árvore solar foram selecionados de acordo com as simulações realizadas no Capítulo 3, que tratou da

simulação, sendo eles: (i) Espiralada com 16 células - M1_16C; (ii) Espiralada com 31 células - M1_31C; e (iii) Conífera com 31 células e 6 camadas - M2_31C_6.

Os protótipos das árvores foram construídos utilizando-se canos de PVC (policloreto de vinila) como tronco, com diâmetro externo de 1,6 cm. Os protótipos tinham uma altura total de 85 cm, sendo que 60 cm eram destinados à copa da árvore, onde as células foram posicionadas, e 25 cm eram destinados à base. A base foi feita de concreto, de forma a dar firmeza e estabilidade às árvores.

Os galhos foram construídos de bambu, com 3,5 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. No protótipo M2_31C_6, modelo conífera, foi necessário a utilização de arame para auxiliar a fixação das células FV (Figura 4.8). As células FV que apresentaram funcionamento nos padrões aceitos durante os testes anteriores foram posicionadas de acordo com o modelo de cada árvore e com os ângulos β e γ encontrados durante as simulações. Foi utilizado um goniômetro para auxiliar o posicionamento das células FV.

Figura 4.8 - Montagem dos protótipos de 31 células para (a) modelo espiralada; (b) modelo conífera



No protótipo 1 (M1_16C) espiralada foram utilizados dois conjuntos de 8 células FV, totalizando 16 células. As 8 células FV com $-90^\circ < \gamma \leq 90^\circ$, foram conectadas em série entre si e formaram um conjunto de células tendendo ao sul. As 8 células FV

com $\gamma \leq -90^\circ$ e $\gamma > 90^\circ$ também foram ligadas em série e formaram o conjunto com células tendendo ao norte.

Para o protótipo 2 (M1_31C) espiralada e protótipo 3 (M2_31C_6) conífera, foram utilizados quatro conjuntos cada, sendo três conjuntos constituídos de 8 células FV em série e um conjunto de 7 células FV em série, totalizando 31 células em cada protótipo. O primeiro conjunto de cada protótipo foi formado pelas 8 células mais altas que tendiam ao norte, ou seja, com $\gamma \leq -90^\circ$ e $\gamma > 90^\circ$. O segundo foi composto pelas 8 células mais altas voltadas ao sul, com $-90^\circ < \gamma \leq 90^\circ$. O terceiro foi constituído pelas 8 células mais baixas voltadas ao norte (com $\gamma \leq -90^\circ$ e $\gamma > 90^\circ$) e o último conjunto pelas 7 células mais baixas voltadas ao sul (com $-90^\circ < \gamma \leq 90^\circ$).

Para fins de comparação da geração de energia elétrica estimada, também foi construído um protótipo que representou um sistema FV tradicional formado por 8 células FV conectadas em série, com inclinação fixa otimizada e $\gamma=180^\circ$, orientadas ao norte. Este protótipo foi o testemunho.

Os conjuntos foram nomeados como disposto na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Nomeação e descrição dos conjuntos com células conectadas em série

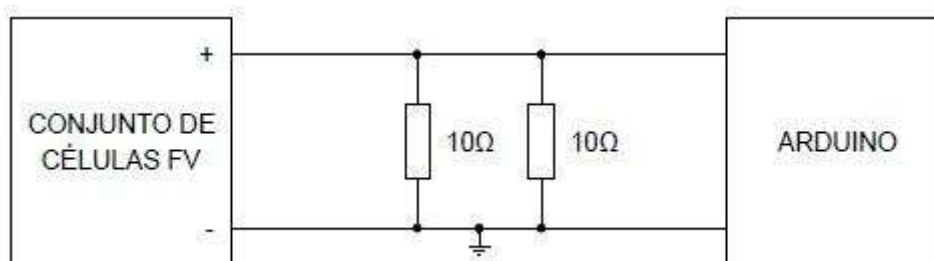
Conjunto	Descrição
TRAD	Sistema tradicional com 8 células FV, com inclinação otimizada e $\gamma=180^\circ$, com área projetada de 71,25 cm ² e potência instalada de 400 Wp
	Árvore solar modelo M1 – espiralada, 116,90 cm ² , potência instalada de 800 Wp
M1_16C_N	8 células FV voltadas ao norte do “Modelo M1 - 16 células”
M1_16C_S	8 células FV voltadas ao sul do “Modelo M1 - 16 células”
	Árvore solar modelo M1 – espiralada, 116,90 cm ² , potência instalada de 1550 Wp
M1_31C_N_A	8 células FV, mais altas, voltadas ao norte do “Modelo M1 - 31 células”
M1_31C_S_A	8 células FV, mais altas, voltadas ao sul do “Modelo M1 - 31 células”
M1_31C_N_B	8 células FV, mais baixas, voltadas ao norte do “Modelo M1 - 31 células”
M1_31C_S_B	7 células FV, mais baixas, voltadas ao sul do “Modelo M1 - 31 células”
	Árvore solar modelo M2 – conífera, 185,78 cm ² , potência instalada de 1550 Wp
M2_31C_6_N_A	8 células FV, mais altas, voltadas ao norte do “Modelo M2 - 31 células - 6 camadas”
M2_31C_6_S_A	8 células FV, mais altas, voltadas ao sul do “Modelo M2 - 31 células - 6 camadas”
M2_31C_6_N_B	8 células FV, mais baixas, voltadas ao norte do “Modelo M2 - 31 células - 6 camadas”
M2_31C_6_S_B	7 células FV, mais baixas, voltadas ao sul do “Modelo M2 - 31 células - 6 camadas”

4.3.3. Experimentos

Os protótipos foram instalados na cobertura do prédio do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, livres de possíveis sombras devido a interferências externas. Os experimentos foram realizados durante 7 dias, sendo eles: 16, 20, 21 e 29 de setembro e 03, 04 e 05 de outubro de 2021, de 6 horas às 18 horas. Foram coletados os dados médios horários para a radiação global local com o auxílio do piranômetro, com intervalo de medição a cada 20 minutos. Para verificar os valores de radiação medidos, foi utilizada a base de dados meteorológicos da Estação Automática Climatológica Principal de Viçosa (UFV, 2021), localizada a cerca de 1,26 km do local do experimento.

Também foram coletados os dados médios horários de tensão nos terminais de cada conjunto de células FV. Para isso, foi conectado uma carga composta por dois resistores de $10\ \Omega$ (com $\frac{1}{4}\ W$ e tolerância entre o valor nominal e o valor real da resistência de até 1%) em paralelo, resultando em uma resistência equivalente de $5\ \Omega$, nos terminais de cada conjunto de células FV, como ilustrado na Figura 4.9. Esse valor de resistência foi escolhido de modo a medir uma tensão muito baixa na carga, mas que ao mesmo tempo fosse possível realizar a leitura com o microcontrolador Arduino, com resolução mínima de aproximadamente 5 mV. A partir dessa tensão medida e da resistência equivalente de $5\ \Omega$ foi possível estimar a corrente elétrica, com um valor bem próximo à corrente de curto-circuito de cada conjunto ($I \approx I_{CC}$), de modo análogo à Equação 4.1.

Figura 4.9 - Esquema de circuito com os resistores em paralelo conectados ao terminal de um conjunto de células FV em funcionamento



Com a corrente de curto-circuito estimada, foi calculada a radiação incidente em cada conjunto de células FV. Segundo Fébba et al. (2018), a corrente de curto-

circuito de um gerador FV sofre pequenas alterações com a variação de temperatura, como mostrado na Figura 4.3. Por outro lado, ela pode ser considerada proporcional à variação da radiação, como visualizado na Figura 4.2, podendo ser descrita pela Equação 4.2 (BLISS et al., 2019),

$$G = G_{STC} \frac{I_{CC}}{I_{STC}} \quad (4.2)$$

em que,

- G – Radiação incidente sobre o conjunto de células FV, W/m²;
- G_{STC} – Radiação na condição *STC*, igual a 1000 W/m²;
- I_{CC} – Corrente medida de curto-circuito, A; e
- I_{STC} – Corrente de curto-circuito na condição *STC*, A.

Em seguida, sabendo-se que a 1000 W/m² cada uma das células FV terá uma potência nominal de 50 mW, estimou-se a potência no conjunto em série de células FV de acordo com a Equação 4.3,

$$P_{con} = n_c P_{nom} \frac{G}{G_{STC}} \quad (4.3)$$

em que,

- P_{con} – Potência no conjunto em série de células FV, W;
- n_c – Número de células FV que formam o conjunto em série, adimensional; e
- P_{nom} – Potência nominal de cada célula FV, W.

Assim, uma vez que a energia elétrica, E_h (Wh), em uma hora h , pode ser dada pela multiplicação de P_{con} por 1 hora, estimou-se a geração de energia elétrica de cada conjunto entre 6 e 18 horas, de acordo com a Equação 4.4,

$$E_{con} = \sum_{h=6}^{18} E_h \quad (4.3)$$

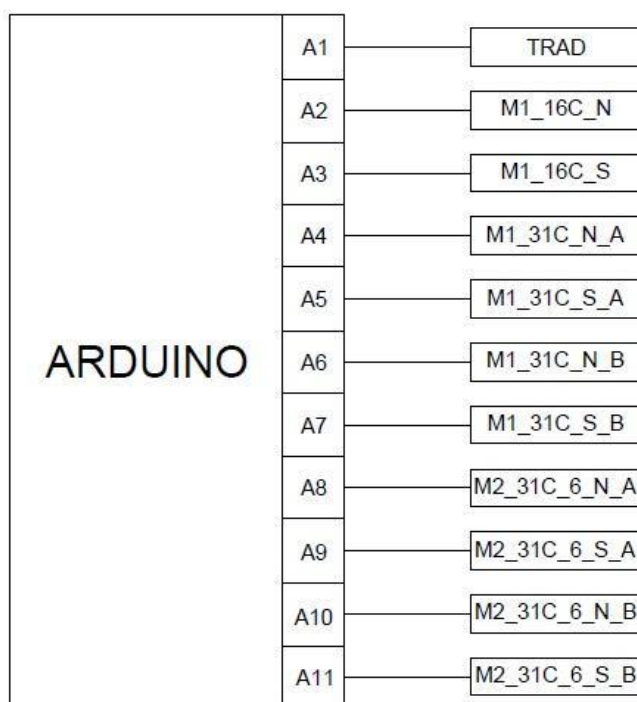
em que,

- E_{con} – Energia elétrica estimada em cada conjunto, Wh.

Para a medição de tensão foi utilizada a placa Arduino MEGA 2560, e a aquisição de dados se deu de forma semelhante ao fluxograma da Figura 4.7, modificando apenas o intervalo de tempo de leitura para 30 segundos. A Figura 4.10

mostra a conexão de cada conjunto de células FV conectadas às entradas analógicas da placa Arduino.

Figura 4.10 - Esquema de conexão dos conjuntos em série de células FV às entradas analógicas da placa Arduino



Deve-se ressaltar que não foi utilizado nenhum dispositivo seguidor do ponto de máxima transferência de potência (SMTP) nos protótipos, muito menos para cada célula FV.

Por fim, foram registradas imagens termográficas das árvores solares com a câmera Flir, modelo E60 (FLIR, 2021). As imagens foram utilizadas para verificar o comportamento da temperatura das células FV, tais como: (i) aumento de temperatura devido a sombreamento; (ii) nível de variação de temperatura nos protótipos; (iii) existência de curto-circuito; entre outros.

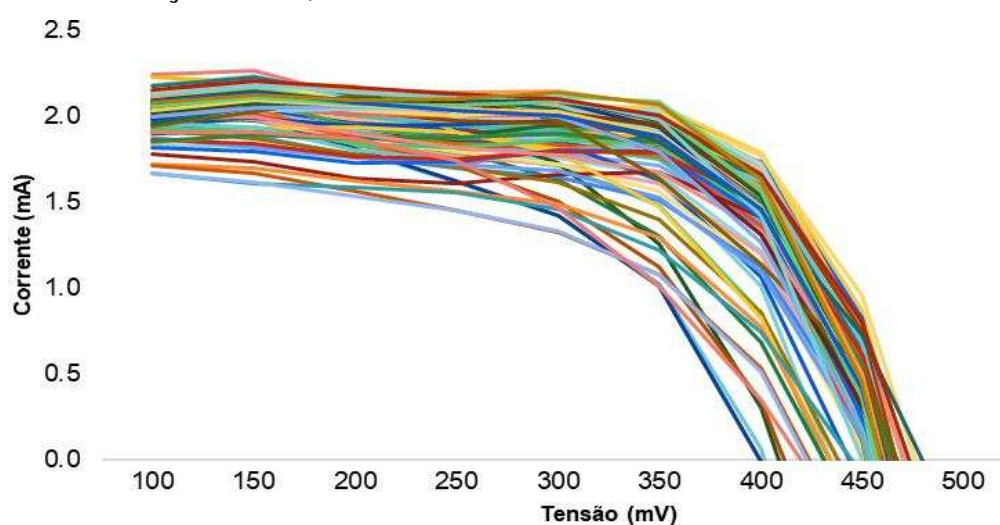
4.4. Resultados e discussão

Analisando os dados técnicos de trinta diferentes geradores fotovoltaicos encontrados na literatura, foi possível determinar uma relação média entre as correntes de curto-circuito e de máxima potência. Foi calculado que a I_{CC} era cerca de 8,97% maior que a I_{MP} . Este valor foi adotado neste estudo. Assim, sabendo-se que

a I_{MP} das células utilizadas, segundo informação do fabricante, era de 100 mA, a I_{CC} considerada para as análises das células FV foi estimada no valor de 108,97 mA.

Antes de iniciar o teste de integridade das células FV, foi realizada a medição da radiação emitida pela lâmpada fluorescente, encontrando um valor de aproximadamente 18,87 W/m². Em seguida, as curvas características I-V das células FV foram esboçadas, como são mostradas na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Curvas características I-V das 105 células FV de silício testadas para a radiação de 18,67 W/m²

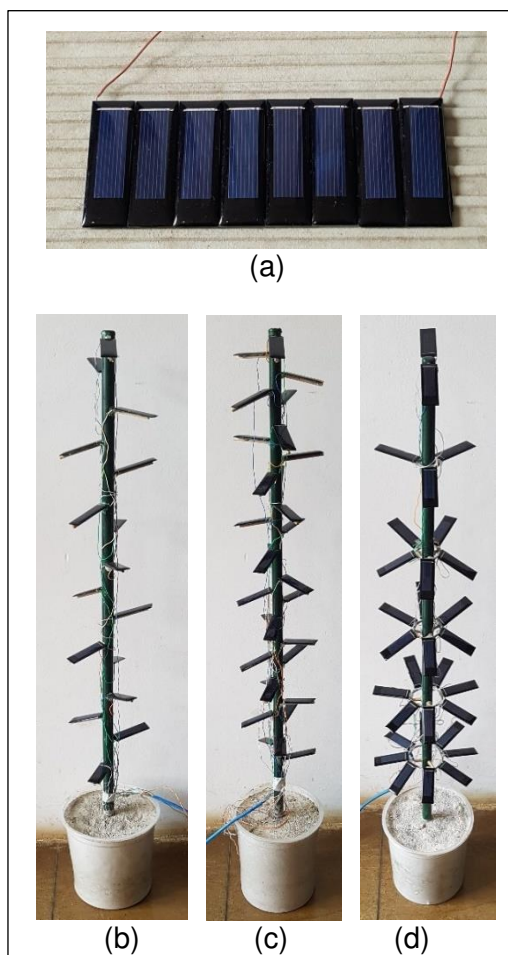


Após o levantamento das curvas características I-V, observou-se que a corrente de curto-circuito, de fato, tendia a um valor proporcional à radiação, pois para uma redução de 53,56 vezes na radiação incidente, de 1000 W/m² para 18,67 W/m², houve uma redução de aproximadamente 53,95 vezes entre a corrente de curto-circuito, 108,97 mA, e a média das correntes máximas das células FV, de 2,02 mA. Esta variação entre a redução da radiação e da corrente foi cerca 0,72%, ou seja, a redução da radiação implicou em uma redução da corrente de curto-circuito em cerca de 99,28% similar, representando o quão significativo foi o teste.

Em seguida, foi realizada uma análise para verificar quais células FV estavam no intervalo de $\pm 10\%$ dos valores médios de tensão medidos. Assim, percebeu-se que 19 células FV não apresentaram respostas dentro desse intervalo estipulado, sendo então, descartadas.

Com as células FV que apresentaram funcionamento nos padrões aceitos, foram construídos os protótipos, como podem ser visualizados na Figura 4.12.

Figura 4.12 - Protótipos desenvolvidos: (a) Sistema FV tradicional com orientação otimizada; (b) Árvore solar do modelo espiralada com 16 células; (c) Árvore solar do modelo espiralada com 31 células; e (d) Árvore solar do modelo conífera com 31 células e 6 camadas



As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a radiação solar horária média medida durante os experimentos e a radiação solar horária média fornecida pela base de dados da Estação Climatológica Principal de Viçosa. Ao observar os gráficos, verificou-se algumas variações entre os valores medidos e os fornecidos pela base de dados. Essas variações podem ser justificadas devido à distância existente entre os dois locais onde os dados foram coletados, e, conseqüentemente, a possíveis nuvens. Além disso, pode haver variações devido aos intervalos de medições utilizados.

Foi possível notar que os dias 16 de setembro e 04 de outubro foram os mais instáveis e apresentaram menores valores de radiação solar. Isso ocorreu pois ambos os dias estavam mais nublados que os demais. Também se observou valores máximos de radiação solar em torno de 960 Wh/m^2 por volta do meio-dia nos dias 21

e 29 de setembro e 03 de outubro. A radiação média diária medida para os dias analisados foi de 5726,75 Wh/m²/dia.

Figura 4.13 - Radiação solar horária média medida na cobertura do Departamento de Engenharia Agrícola – UFV e radiação solar horária média fornecida pela Estação Climatológica Principal de Viçosa para os dias 16, 20, 21 e 29 de setembro de 2021

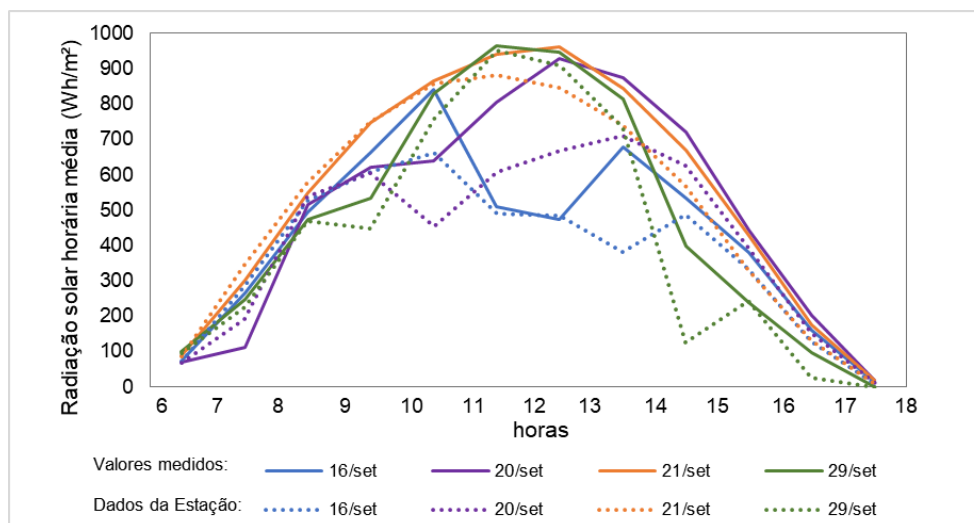
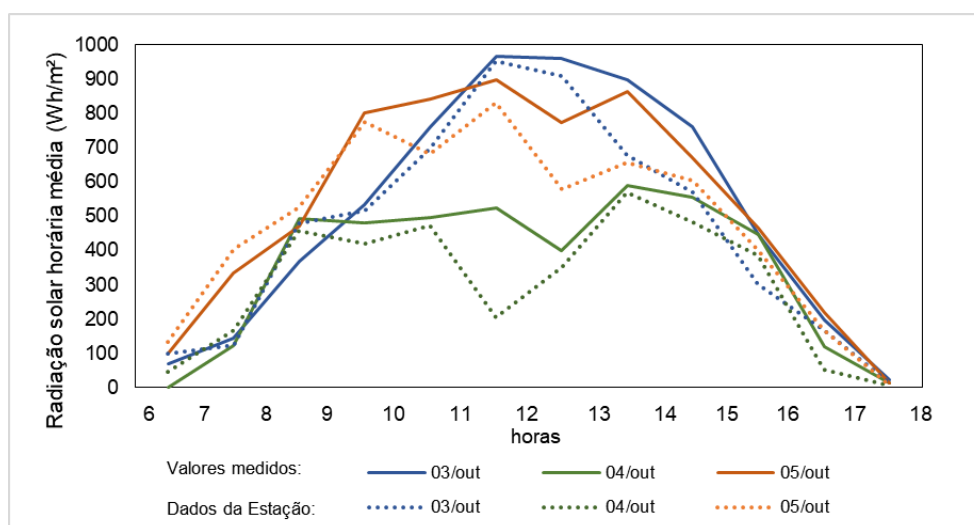


Figura 4.14 - Radiação solar horária média medida na cobertura do Departamento de Engenharia Agrícola – UFV e radiação solar horária média fornecida pela Estação Climatológica Principal de Viçosa para os dias 03, 04 e 05 de outubro de 2021

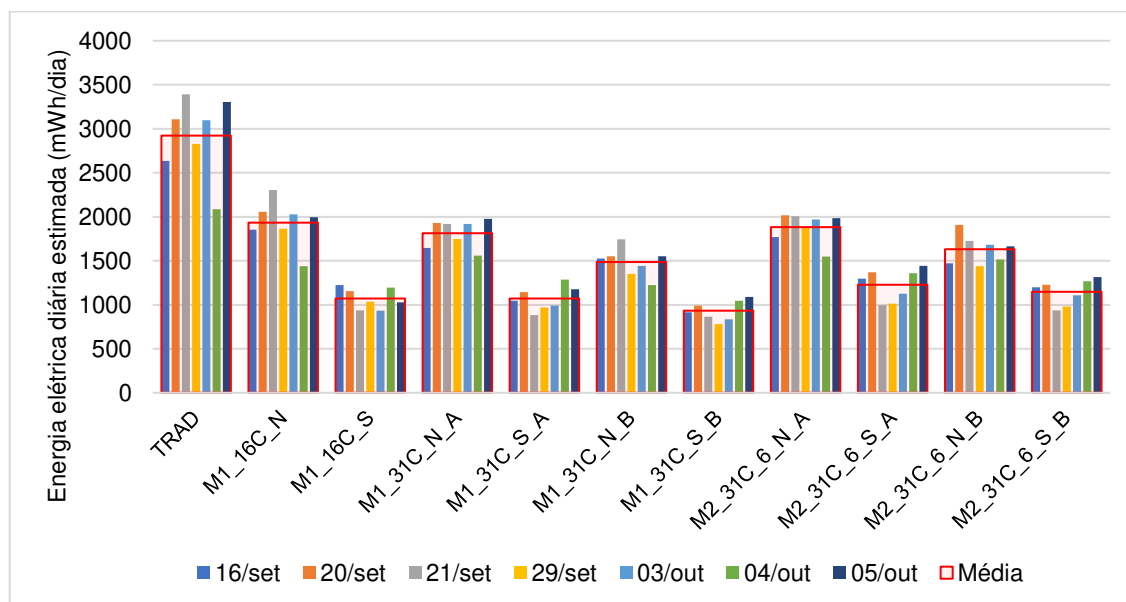


Os protótipos foram expostos à radiação solar durante os dias supracitados e, com os valores medidos de tensão, foram determinadas as correntes elétricas. A radiação incidente em cada conjunto de células FV foi então estimada a partir das correntes elétricas. Em seguida, por meio destes valores foi estimada a geração de energia elétrica.

Os resultados encontrados foram analisados de acordo com a geração de energia elétrica estimada para cada conjunto de células FV e para cada um dos protótipos estudados. Também foram analisadas a geração de energia elétrica estimada por célula FV e por área projetada de cada protótipo, de acordo com os dados da Tabela 4.4.

Desta forma, a geração de energia elétrica diária estimada para cada conjunto de células FV pode ser visualizada na Figura 4.15. Ao analisar apenas os conjuntos de células FV, observou-se que o conjunto TRAD apresentou a maior geração de energia em todos os dias em que houve coleta de dados.

Figura 4.15 – Geração de energia elétrica diária estimada dos conjuntos de células FV dos protótipos



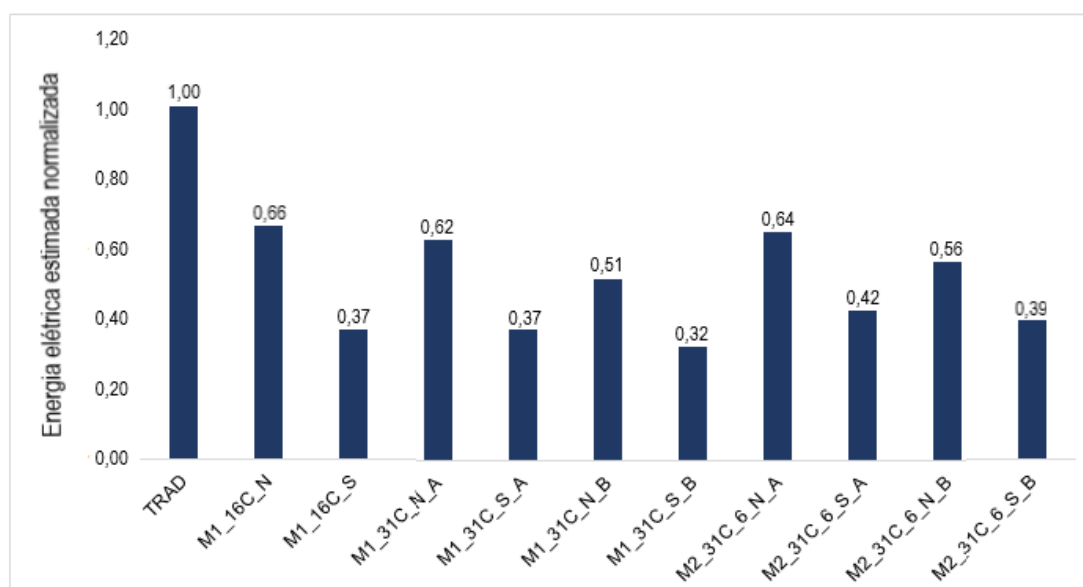
A Tabela 4.5 apresenta a geração de energia elétrica estimada acumulada durante os sete dias de experimentos para os conjuntos de células FV. Por meio da Figura 4.15 e da Tabela 4.5 foi possível notar que os conjuntos que possuíam as células FV tendendo ao sul tiveram uma geração de energia elétrica estimada menor,

se comparados com os conjuntos tendendo ao norte. A Figura 4.16 apresenta os dados médios normalizados com base na geração de energia elétrica estimada para o conjunto TRAD. Percebeu-se, no modelo espiralada com 16 células FV, um valor normalizado de 0,66 para o conjunto tendendo ao norte (M1_16C_N), e 0,37 para o conjunto tendendo ao sul (M1_16C_S). Para os modelos M1_31C e M2_31C_6 também foram observadas reduções nos conjuntos tendendo ao sul, chegando a um valor mínimo no conjunto M1_31C_S_B, com 0,32.

Tabela 4.5 - Geração de energia elétrica estimada acumulada durante os sete dias de experimentos para os conjuntos de células FV

	TRAD	M1_16C	M1_31C	M2_31C_6
Energia elétrica estimada por conjunto tendendo ao norte (Wh)	20,45	13,54	-	-
Energia elétrica estimada por conjunto tendendo ao norte - alto (Wh)	-	-	12,70	13,17
Energia elétrica estimada por conjunto tendendo ao norte - baixo (Wh)	-	-	10,39	11,41
Energia elétrica estimada por conjunto tendendo ao sul (Wh)	-	7,50	-	-
Energia elétrica estimada por conjunto tendendo ao sul - alto (Wh)	-	-	7,50	8,60
Energia elétrica estimada por conjunto tendendo ao sul - baixo (Wh)	-	-	6,51	8,03

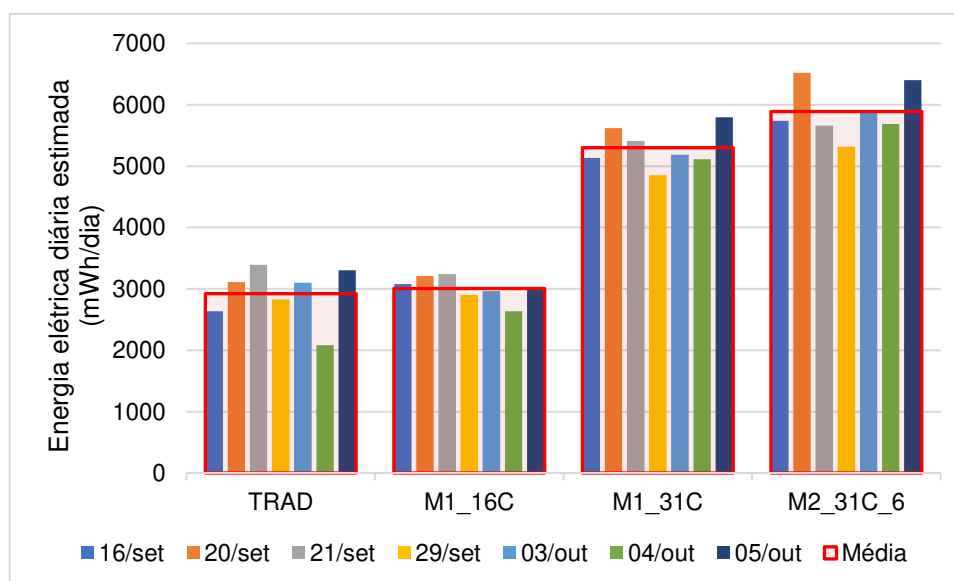
Figura 4.16 - Geração de energia elétrica estimada normalizada



Ainda pela Figura 4.16 foi possível observar que os conjuntos de células FV localizados na parte de baixo das árvores geraram menos energia, provavelmente, devido ao sombreamento gerado pelas células FV dos conjuntos superiores. Por exemplo, o conjunto M1_31C_N_B obteve um valor normalizado de 0,51 enquanto o conjunto M1_31C_N_A obteve 0,62. De modo análogo, o conjunto M1_31C_S_B obteve um valor normalizado de 0,32 enquanto o conjunto M1_31C_S_A obteve 0,37. Entretanto, para este último caso, ressalta-se que o conjunto M1_31C_S_B (assim como o M2_31C_6_S_B) possui apenas 7 células FV, já o conjunto M1_31C_S_A possui 8 células FV.

A Figura 4.17 mostra a geração de energia elétrica diária estimada para cada um dos protótipos estudados. Foi possível constatar que o protótipo M2_31C_6 apresentou a maior geração de energia elétrica estimada para todos os dias analisados. Entretanto, deve-se ressaltar que os protótipos TRAD e M1_16C possuíam apenas 8 e 16 células FV, respectivamente, enquanto os protótipos M1_31C e M2_31C_6 possuíam 31 células FV cada. Ademais, houve uma pequena diferença entre a geração dos protótipos TRAD e M1_16C, sendo este último apenas 2,9% maior que o TRAD.

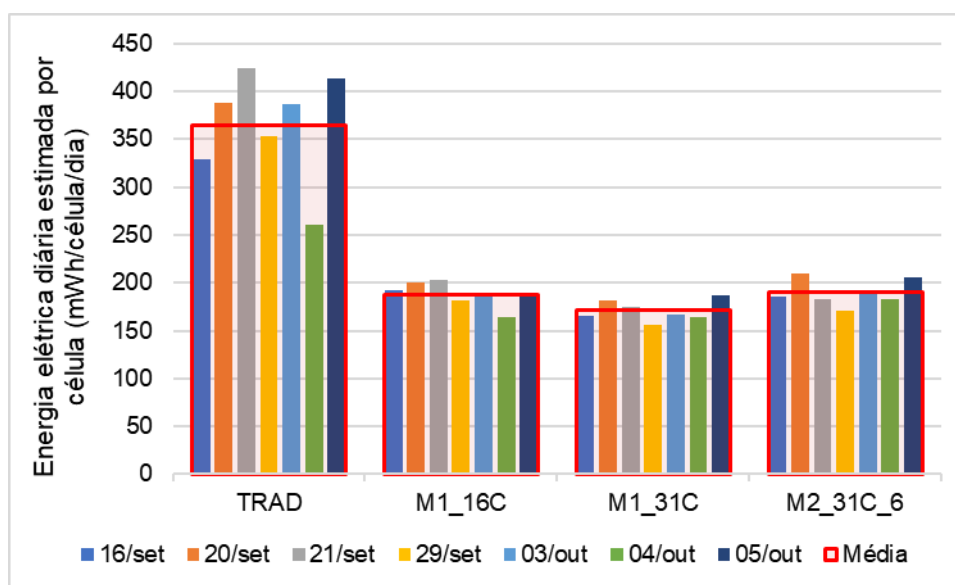
Figura 4.17 - Geração de energia elétrica diária estimada para cada protótipo estudado



Ao analisar a geração de energia elétrica diária estimada por célula FV para cada protótipo (Figura 4.18), concluiu-se que o protótipo TRAD obteve a maior

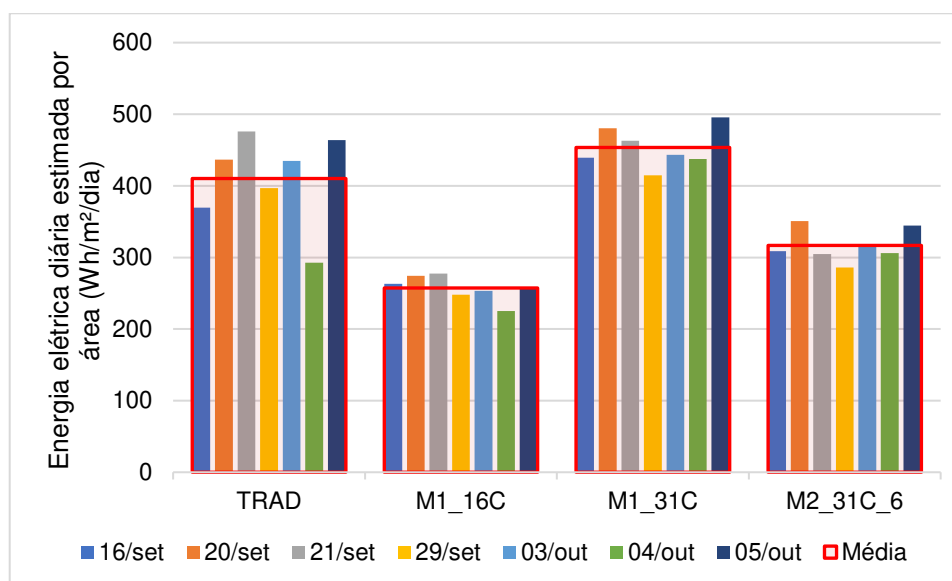
eficiência. Isso ocorreu pois os protótipos desenvolvidos no modelo de árvore solar sofriam influências de sombreamento devido às próprias células FV e devido aos troncos e galhos, enquanto o protótipo TRAD estava com todas as células FV posicionadas lado a lado, sem obstáculos para interferir a radiação solar incidente em suas células.

Figura 4.18 - Geração de energia elétrica diária estimada por célula FV para cada protótipo estudado



Quando estimada a geração de energia elétrica diária por área projetada de cada protótipo, notou-se que o protótipo M1_31C obteve o melhor resultado (Figura 4.19). Isso pode ser justificado por ser o modelo que apresentou o maior número de células FV ocupando uma menor área projetada. O protótipo que gerou menos energia elétrica por área, foi o M1_16C. Observou-se, também, que os protótipos M1_16C e M2_31C_6 obtiveram valores menores no quesito geração de energia elétrica por área que o protótipo TRAD.

Figura 4.19 - Geração de energia elétrica diária estimada por área para cada protótipo estudado



A Tabela 4.6 exibe os valores acumulados de geração de energia elétrica estimada durante os sete dias de experimentos. Empregando o protótipo TRAD como caso base, verificou-se que os protótipos M1_16C, M1_31C e M2_31C_6 obtiveram ganhos estimados de geração de energia elétrica de 2,91%, 81,44% e 101,54%, respectivamente. Entretanto, ressalta-se que que o protótipo TRAD foi formado por apenas 8 células FV, enquanto o M1_16C foi composto por 16 células FV e os protótipos M1_31C e M2_31C_6 por 31 células FV cada. Desta forma, comparando o protótipo M2_31C_6 com o TRAD, constatou-se que foram necessárias 287,50% mais células FV para um ganho de energia de aproximadamente 101,54%.

Tabela 4.6 - Geração de energia elétrica estimada acumulada durante os sete dias de experimentos para os quatro protótipos

	TRAD	M1_16C	M1_31C	M2_31C_6
Energia elétrica estimada (Wh)	20,45	21,04	37,10	41,21
Energia elétrica estimada por célula FV (Wh/célula)	2,56	1,32	1,20	1,33
Energia elétrica estimada por área (Wh/m²)	2869,93	1800,11	3173,76	2218,28

Considerando apenas os protótipos do modelo espiralada (M1), foi encontrado que o protótipo M1_31C obteve uma geração de energia elétrica estimada de 37,10 Wh durante os sete dias (Tabela 4.6), cerca de 76,31% a mais que o protótipo M1_16C. No trabalho desenvolvido por Pinto (2018) foi encontrado um ganho de apenas 3,36% entre o protótipo espiralada de 30 células FV com o de 16 células FV. Entretanto, deve-se ressaltar algumas distinções entre os dois trabalhos. Primeiramente, os protótipos desenvolvidos por Pinto (2018) apresentaram maiores diâmetro dos troncos e comprimento dos galhos, o que poderiam gerar níveis de sombreamento mais significativos. Todas as células FV utilizadas nos protótipos de Pinto (2018) foram posicionadas com inclinação igual a latitude, ou seja, não houve uma otimização para a orientação de cada célula FV. Além disso, o autor construiu cada protótipo com dois conjuntos de células em série, em paralelo. Isto é, o protótipo de 30 células foi composto por dois conjuntos em paralelo, em que cada conjunto teve 15 células em série, e o protótipo de 16 células foi composto por dois conjuntos em paralelo de 8 células em série. Ademais, o autor citado realizou os experimentos em apenas três horas do dia, durante 5 dias entre os meses de abril e maio, totalizando 15 horas de amostras. Esses são alguns dos fatores que podem justificar a diferença dos resultados das duas pesquisas.

Ao analisar a geração de energia elétrica estimada por célula FV (Tabela 4.6), percebeu-se o protótipo TRAD como o mais vantajoso. Os protótipos M1_16C, M1_31C e M2_31C_6 atingiram, respectivamente, apenas 51,45%, 46,82% e 52,01% do valor encontrado para o protótipo TRAD. Entre os protótipos de árvores solares, concluiu-se que o protótipo M2_31C_6 apresentou o maior valor de geração de energia elétrica estimada por célula FV, visto que sua área projetada era maior e as suas células FV estavam mais espaçadas do tronco, tendo, assim, sombreamentos reduzidos, se comparada com o modelo espiralado. O modelo M1_31C foi o que obteve o menor índice e, provavelmente, foi o mais afetado pelo sombreamento. Nas simulações realizadas no Capítulo 3, os casos M1_16C, M1_31C e M2_31C_6 atingiram, respectivamente, 89,61%, 86,14% e 88,81% do valor de radiação solar por célula encontrado para o caso da célula FV com orientação fixa otimizada.

Já no quesito geração de energia elétrica estimada por área (Tabela 4.6), constatou-se que o protótipo M1_31C foi o melhor, com 3173,76 Wh/m², cerca de 10,59% a mais quando comparado com o protótipo TRAD. Os protótipos M1_16C e M2_31C_6 não se mostraram vantajosos, apresentando 37,28% e 22,71% a menos

que o protótipo TRAD. Nas simulações realizadas no Capítulo 3, os casos M1_16C, M1_31C e M2_31C_6 obtiveram, respectivamente, ganhos de 9,25%, 103,46% e 31,98% de radiação solar por área projetada, quando comparados com uma célula FV com orientação otimizada.

Ao comparar os resultados obtidos por meio dos experimentos e simulações, concluiu-se que todos os protótipos de árvores solares continuaram sendo inviáveis à um sistema tradicional com orientação fixa otimizada quando o objetivo é a otimização de energia por célula FV. Também se confirmou que o modelo M1_31C foi o melhor para a otimização de energia por área ocupada, apesar da redução significativa entre os ganhos obtidos pela simulação e pelo experimento.

Ressalta-se que a simulação de otimização dos ângulos de orientação das células no Capítulo 3 foi realizada considerando um período anual e os dados experimentais foram coletados durante apenas sete dias dos meses de setembro e outubro. Isto é, os ângulos utilizados para a construção desses protótipos podem não ser os ângulos ótimos para os meses de setembro e outubro. Além disso, ressalta-se que a associação em série das células FV resulta em uma redução da geração de energia do conjunto, visto que, se uma célula FV é sombreada em um determinado momento, ela acaba limitando a corrente elétrica para todas as demais células FV em série com ela. Também, salienta-se que as simulações não consideraram o sombreamento gerado por troncos e galhos. Deve-se reforçar que não foi utilizado nenhum dispositivo seguidor do ponto de máxima transferência de potência (SMTP) nos protótipos, muito menos para cada célula FV, o que seria o ideal para se obter uma otimização da geração de energia elétrica numa situação real.

A Figura 4.20 exhibe as imagens termográficas obtidas dos quatro protótipos em funcionamento. Durante a realização dos experimentos não foi constatada nenhuma alteração significativa na temperatura das células FV. A Figura 4.21 (a) mostra o instante em que uma célula FV foi parcialmente sombreada pelo tronco. Para verificar uma possível variação de temperatura devido ao sombreamento, foi registrado a imagem termográfica, como mostrado na Figura 4.21 (b), e percebeu-se que, para o protótipo analisado, não foi encontrada uma discrepância significativa entre a temperatura da célula FV sombreada e a temperatura das demais células livres de sombras.

Figura 4.20 - Imagens termográficas dos protótipos em funcionamento: (a) Sistema FV tradicional com orientação otimizada; (b) Árvore solar do modelo espiralada com 16 células; (c) Árvore solar do modelo espiralada com 31 células; e (d) Árvore solar do modelo conífera com 31 células e 6 camadas

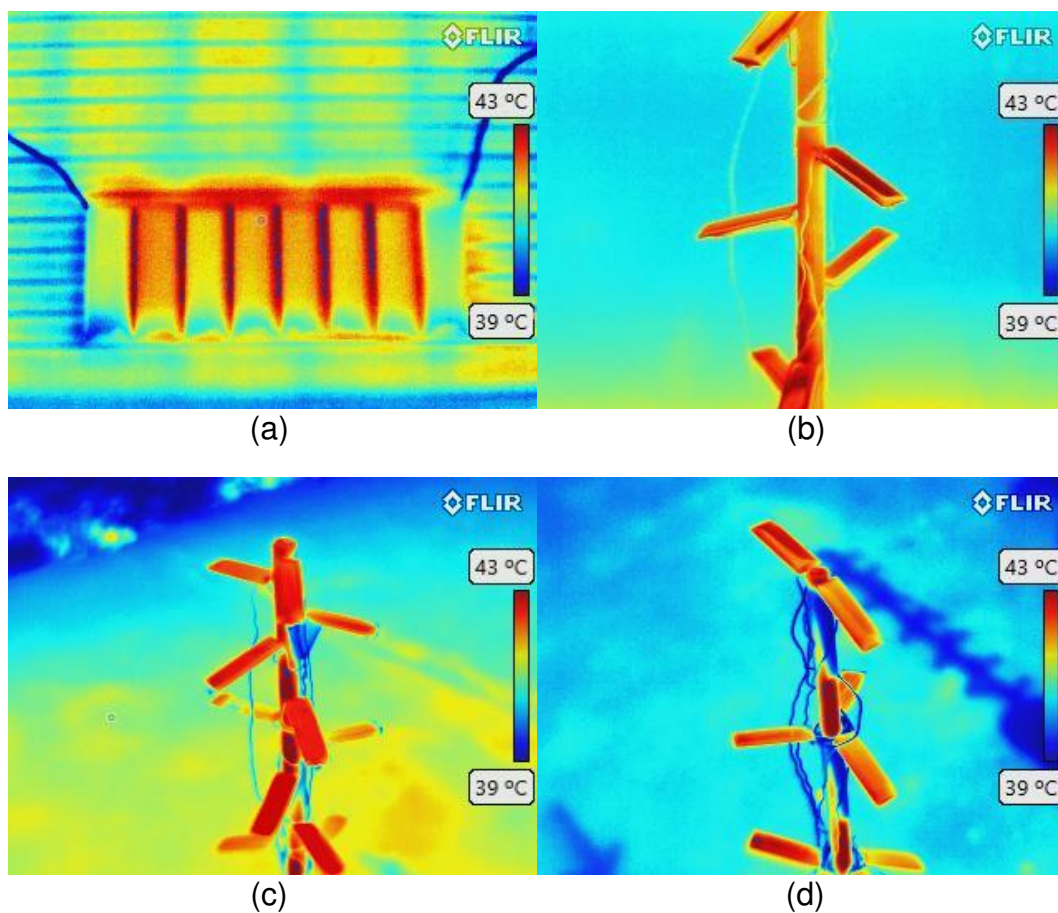
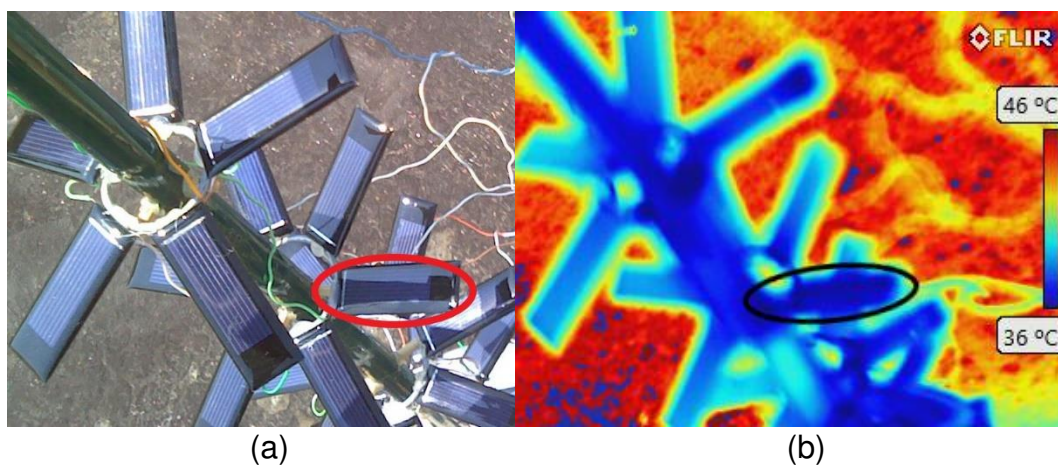


Figura 4.21 – (a) Imagem da célula FV sombreada do protótipo M2_31C_6: Árvore solar do modelo conífera com 31 células e 6 camadas; (b) Imagem termográfica



4.5. Conclusão

Neste trabalho foram projetados e construídos quatro protótipos de sistemas fotovoltaicos, sendo um protótipo de um sistema fotovoltaico tradicional de 8 células FV com orientações fixas otimizadas, dois protótipos de árvore solar do modelo espiralada, um com 16 células FV e o outro com 31 células FV, e um protótipo de árvore solar do modelo conífera com 31 células FV e 6 camadas. Foi observado que o protótipo de árvore do modelo conífera com 31 células fotovoltaicas e 6 camadas foi o que obteve maiores valores de geração de energia elétrica estimada durante o experimento. Entretanto, salienta-se que ele foi constituído por mais células FV que o protótipo do sistema tradicional, com 8 células FV e o protótipo do modelo espiralada de 16 células FV.

Assim, ao se analisar a geração de energia elétrica estimada por célula FV, foi constatado que o protótipo do sistema FV tradicional com orientação fixa otimizada foi o mais vantajoso. Esse resultado é justificado pois os protótipos desenvolvidos no modelo de árvore solar foram afetados com as sombras geradas devido aos troncos, galhos e às próprias células FV, reduzindo, assim, a radiação solar sobre as células FV e, conseqüentemente, a geração de energia elétrica. Comparando apenas os protótipos de árvores solares, o modelo de árvore conífera obteve uma média de geração de energia elétrica estimada por célula FV maior que as árvores do modelo espiralada.

Quando o objetivo é a geração de energia elétrica por área, foi verificado que o protótipo de árvore do modelo espiralada com 31 células FV foi o mais vantajoso. Os protótipos do modelo espiralada com 16 células FV e do modelo conífera com 31 células se mostraram menos interessantes que o protótipo do sistema FV tradicional com orientação fixa otimizada, apresentando menores valores de geração de energia elétrica por área. Ou seja, a construção deste último é mais vantajosa que a construção de árvores do modelo espiralada com 16 células FV ou do modelo conífera com 31 células.

4.6. Referências bibliográficas

ADEEB, J.; FARHAN, A.; AL-SALAYMEH, A. Temperature effect on performance of different solar cell technologies. **Journal of Ecological Engineering**, v. 20, n. 5, p. 249-254, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.12911/22998993/105543>. Acesso em: 06 jul. 2021.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5ª ed. AMGH Editora Ltda. Porto Alegre. p. 874. 2013.

ARAÚJO, A. L. P. L.; LOPES, A. V. S. L.; MOREIRA, A. B. Topologias em traçador de curva I-V para módulos fotovoltaicos. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. 2020. p. 1-11. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/829>. Acesso em: 08 jul. 2021.

ARDUINO. Arduino Mega 2560 REV3. ARDUINO.CC, 2018. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>. Acesso em: 19 jun. 2021.

AYALA-MATÓ, F. SEURET-JIMÉNEZ, D. ESCOBEDO-ALATORRE, J. J. VIGIL-GALÁN, O. COUREL, M. A hybrid method for solar cell parameter estimation. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**. v. 9, p. 1 – 10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4985953>. Acesso em: 02 ago. 2021.

BLD SOLAR. Datasheet Photovoltaic Modules. Disponível em: <http://eprints.polsri.ac.id/4627/11/Solar%20Cell.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

BLISS, M.; BETTS, T.; GOTTSCHALG, R.; SALIS, E.; MÜLLEJANS, H.; WINTER, S.; KROEGER, I.; BOTHE, K.; HINKEN, D.; HOHL-EBINGER, J. Interlaboratory comparison of short-circuit current versus irradiance linearity measurements of photovoltaic devices. **Solar Energy**. v. 182, p. 256-263. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.031>. Acesso em: 20 set. 2021.

CANADIAN SOLAR. Datasheet: High density MONO PERC module – 400 W ~ 420 W. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian-Solar-Datasheet-HiDM-CS1U-MS-EN.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

DEY, S.; LAKSHMANAN, M. K.; PESALA, B. Tuning the solar power generation curve by optimal design of solar tree orientations. **Advances in Energy Research**. India, v. 1, p. 461-469, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2666-4_45. Acesso em: 15 ago. 2021.

FÉBBA, D. M.; RUBINGER, R. M.; OLIVEIRA, A. F.; BORTONI, E. C. Impacts of temperature and irradiance on polycrystalline silicon solar cells parameters. **Solar Energy**. v. 174, p. 628 – 639, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.051>. Acesso em: 12 set. 2021.

FLIR. Câmera Termográfica FLIR E60. Teledyne FLIR. Disponível em: <https://www.flir.com.br/support/products/e60/#Overview>. Acesso em: 10 out. 2021.

GANGWAR, P.; SINGH, R.; TRIPATHI, R. P.; SINGH, A. K. Effective solar power harnessing using a few novel solar tree designs and their performance assessment. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental**. p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1549162>. Acesso em: 03 mar. 2021.

HYDER, F.; SUDHAKAR, K.; MAMAT, R. Solar PV tree design: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1079-1096, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.025>. Acesso em: 06 dez. 2020.

KIPP & ZONEN. Disponível em: <https://www.kippzonen.com/Product/12/CMP6-Pyranometer#.YWi2mxrMJPY>. Acesso em: 27 jul. 2021.

MITSUBISHI ELECTRIC. Mitsubishi Electric Photovoltaic Module – Datasheet. Disponível em: https://www.mitsubishielectricsolar.com/images/uploads/documents/specs/MLU_spec_sheet_250W_255W.pdf. Acesso em: 20 out. 2021.

MOCHIZUKI, Y.; YACHI, T. Relationship between power generated and series/parallel solar panel configurations for 3D Fibonacci PV modules. 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. USA. 2017. p. 5-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191253>. Acesso em: 22 ago. 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, p. 1-529. 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/Manual_de_Engenharia_FV_2014. Acesso em: 26 mai. 2021.

PINTO, A. C. V. **Desenvolvimento de um protótipo de árvore fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/22199>. Acesso em: 06 out. 2021.

RAM, J. P.; MANGHANI, H.; PILLAI, D. S.; BABU, T. S.; MIYATAKE, M.; RAJASEKAR, N. Analysis on solar PV emulators: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 149-160, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.039>. Acesso em: 26 jul. 2021.

RISEN. Datasheet: Polycrystallion Silicon Cell 156x156 mm. Disponível em: <https://cdn.ensolar.com/Product/pdf/Cell/51c7ff713c077.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

RODRIGUES, H. H.; SPAGNOLO, R.; SILVA, G. M.; JUNIOR, J. B. Automação de árvores solares. **Brazilian Journal of Development**, Brasil, v. 5, n. 10, p. 17628-17639, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv5n10-035>. Acesso em: 16 set. 2021.

SUNCECO. 300 W – 320 W Poly-crystalline Solar Module. Disponível em: <http://sunceco.com/wp-content/uploads/2017/01/SEP300-320.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

SUNYIMA. Mini painel solar. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/32717618499.html>. Acesso em: 03 fev. 2021.

SWARAJ, K.; MOHAPATRA, A.; SAHOO, S. S. Combining PV MPPT algorithm based on temperature measurement with a PV cooling system. International conference on signal processing, communication, power and embedded system. Paralakhemundi. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SCOPES.2016.7955876>. Acesso em: 05 out. 2021.

TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet: LM35 precision centigrade temperature sensors. TI, 2017. Disponível em: <https://www.ti.com/product/LM35?qqpn=lm35>. Acesso em: 19 jun. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. Departamento de Engenharia Agrícola. Estação Climatológica Principal de Viçosa. **Boletim meteorológico 2021**. Viçosa, MG: UFV, 2021. Disponível em: https://www.posmet.ufv.br/?page_id=1253. Acesso em: 10 out. 2021.

VIEIRA, R. G.; ARAÚJO, F. M. U.; DHIMISH, M.; GUERRA, M. I. S. A comprehensive review on bypass diode application on photovoltaic modules. **Energies**, v. 13, p. 1-21, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13102472>. Acesso em: 13 set. 2021.

ZHANG, Z.; WU, J.; WANG, L.; LIU, F.; JIA, P.; DAI, L.; LU, Y.; BIAN, T. The analysis on simulation and invalidation of hot-spot temperature distribution in micro-defective crystalline silicon solar cells. **Renewable Energy**, v. 147, p. 2218-2228, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.120>. Acesso em: 05 ago. 2021.

5. CONCLUSÕES GERAIS

5.1. Conclusões

Este trabalho teve como motivação principal a discussão e análise do desenvolvimento, construção e uso de árvore solar fotovoltaica como um meio de geração de energia elétrica renovável. Dentre os modelos de protótipos estudados, foram analisados o ganho de energia otimizando-se a área ocupada, a perda de energia devido ao sombreamento entre células e a energia absorvida e gerada em média por célula fotovoltaica.

No Capítulo 2, concluiu-se que muitas pesquisas têm empregado modelos de árvores naturais para projetar árvores solares com o objetivo de se obter maior eficiência na absorção de radiação solar e, conseqüentemente, maior eficiência de geração de energia elétrica. Observou-se que a maioria dos projetos utilizam a filotaxia espiralada e, principalmente, seguem o padrão da sequência de Fibonacci para determinar o distanciamento angular entre folhas subsequentes. Verificou-se que, apesar de já existirem árvores solares sendo desenvolvidas, ainda há poucos estudos direcionados à otimização da geração de energia elétrica por área ocupada e/ou orientação de geradores fotovoltaicos em árvores solares. Também foi constatado que pode haver um uso múltiplo do local onde a árvore solar é instalada, utilizando a área abaixo dos geradores fotovoltaicos para outros fins, como produção agrícola, área de lazer, usinas flutuantes e estacionamentos sombreados.

No Capítulo 3, percebeu-se que a modelagem e simulação das árvores solares são fundamentais para se determinar os ângulos de inclinação e de azimute dos geradores fotovoltaicos e, conseqüentemente, otimizar a absorção de energia. Ao analisar um único gerador fotovoltaico, concluiu-se que, para a cidade de Viçosa – MG, o ângulo de inclinação ótimo foi igual ao módulo da latitude. Para as cidades de Boa Vista – RR e Chuí – RS, o ângulo de inclinação ótimo variou de $+1^\circ$ e -8° , respectivamente, do módulo da latitude local. Já o ângulo de azimute ótimo foi de 180° , ou seja, voltado ao norte, para os geradores fotovoltaicos localizados no hemisfério sul, e de 0° para os geradores do hemisfério norte. Ao analisar e comparar os modelos de árvores solares do tipo espiralada e conífera, foi verificado que as perdas por sombreamento são maiores nas árvores do modelo espiralada, reduzindo, assim, a radiação solar média por célula fotovoltaica. Entretanto, em situações que se

visar a maximização de radiação solar por área ocupada, foi constatado que o modelo de árvore com filotaxia espiralada foi o mais vantajoso.

No Capítulo 4 foram desenvolvidos protótipos de árvores solares do modelo espiralada e conífera, além do protótipo de um sistema fotovoltaico tradicional com orientação fixa otimizada, com a finalidade de se realizar validação das simulações. Ao comparar apenas os protótipos de árvores solares, concluiu-se que, qualitativamente, os resultados foram semelhantes aos encontrados no Capítulo 3, em que as árvores espiraladas tendem a ser mais eficientes no ganho de energia elétrica gerada por área ocupada, enquanto a conífera apresentou um maior índice de energia por célula fotovoltaica. Entretanto, de modo quantitativo, esses ganhos foram significativamente reduzidos, tornando, em alguns casos, os protótipos inviáveis, quando comparados com um sistema fotovoltaico tradicional com orientação fixa otimizada. Este último se mostrou mais vantajoso que todas as árvores solares estudadas quando o objetivo foi a maximização de energia elétrica gerada por célula, e só foi menos eficiente que a árvore com filotaxia espiralada com 31 células fotovoltaicas quando se objetivou a energia elétrica gerada por área ocupada.

Por fim, constatou-se que o tema abordado neste trabalho é promissor e muitas pesquisas relacionadas à otimização da geração fotovoltaica por área ocupada, ao potencial de aplicações que dependem de estética e ao uso múltiplo das árvores solares ainda devem ser realizados.

Concluiu-se que ainda se tem a necessidade de estudos mais específicos abordando: i) modelagem e simulação do sombreamento gerado por troncos e galhos e, conseqüentemente, das perdas; (ii) projetos de novos modelos de árvores solares, com diferentes dimensões e características construtivas; (iii) análise estrutural das árvores solares; (iv) análise de viabilidade econômica; (v) emprego de um dispositivo SMTP nos geradores fotovoltaicos; e (vi) validação de protótipos em um período maior.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

A seguir foram apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo de outros modelos de árvores, diversificando suas dimensões (principalmente em escala real), número de geradores fotovoltaicos e potência instalada.

- Estudo para casos de “floresta”, em que se objetive a instalação de árvores solares próximas umas das outras. É necessário a análise do distanciamento mínimo entre árvores de modo não se obter um sombreamento significativo entre elas.
- Realizar modelagens e simulações para estimar o sombreamento dos galhos e tronco.
- Desenvolver uma análise de viabilidade econômica com base no ganho de energia elétrica gerada, na área ocupada e no custo de instalação do sistema.
- Variar a função objetivo para maximizar a geração de energia elétrica por estações do ano, ou épocas específicas.
- Analisar outras possíveis conexões (série/paralelo) entre os geradores fotovoltaicos, tanto em tamanho real como em pequena escala.
- Estudar a implementação e viabilidade econômica de dispositivos SMTP nas árvores solares e, até mesmo, em cada gerador fotovoltaico.
- Estudar o uso múltiplo entre árvore solar fotovoltaica e outras atividades, como a produção agrícola, usinas flutuantes e estacionamentos.
- Analisar a relação entre o sombreamento e vida útil dos geradores fotovoltaicos empregados na árvore solar fotovoltaica.
- Desenvolvimento de análise estrutural da árvore solar e seus possíveis locais de instalação, como coberturas de edifícios.
- Realizar estudo de árvores fotovoltaicas com células bifaciais.
- Analisar o aumento da eficiência e vida útil dos geradores fotovoltaicos devido à utilização da área abaixo dos geradores para a produção agrícola e, conseqüentemente, reduzindo a temperatura do ambiente e dos geradores.

APÊNDICE A

Ângulos de orientação das células FV e radiação solar anual nas árvores solares fotovoltaicas

Tabela A1 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 16, 21, 25 e 31 células FV do modelo M1, para a cidade de Boa Vista – RR

Célula	γ (°)	β (°)			
		M1_16C	M1_21C	M1_25C	M1_31C
1	0,0	4	4	4	4
2	137,5	0	0	0	0
3	-85,0	3	3	5	5
4	52,5	5	5	5	5
5	-170,0	0	0	0	0
6	-32,5	5	5	4	5
7	105,0	2	1	3	2
8	-117,5	1	2	0	3
9	20,0	5	4	5	5
10	157,5	-1	-2	0	-1
11	-65,0	3	3	5	5
12	72,5	5	3	3	3
13	-150,0	0	0	0	0
14	-12,5	5	4	5	5
15	125,0	1	0	0	0
16	-97,5	2	2	3	5
17	40,0		4	5	5
18	177,5		-1	0	0
19	-45,0		3	5	4
20	92,5		0	2	0
21	-130,0		0	0	2
22	7,5			5	4
23	145,0			0	-1
24	-77,5			3	5
25	60,0			5	5
26	-162,5				0
27	-25,0				5
28	112,5				0
29	-110,0				3
30	27,5				5
31	165,0				0

Tabela A2 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 41 e 61 células do modelo M1, para a cidade de Boa Vista – RR

Célula	γ (°)	β (°)		Célula	γ (°)	β (°)	
		M1_41C	M1_61C			M1_41C	M1_61C
1	0,0	4	4	32	-57,5	5	3
2	137,5	0	0	33	80,0	5	5
3	-85,0	6	5	34	-142,5	0	-1
4	52,5	5	6	35	-5,0	5	2
5	-170,0	0	1	36	132,5	0	1
6	-32,5	4	3	37	-90,0	5	2
7	105,0	5	5	38	47,5	3	3
8	-117,5	3	3	39	-175,0	0	0
9	20,0	0	5	40	-37,5	5	3
10	157,5	0	0	41	100,0	5	4
11	-65,0	5	5	42	-122,5		1
12	72,5	5	5	43	15,0		0
13	-150,0	0	0	44	152,5		-1
14	-12,5	3	2	45	-70,0		5
15	125,0	0	2	46	67,5		5
16	-97,5	5	2	47	-155,0		-2
17	40,0	5	3	48	-17,5		0
18	177,5	-2	-1	49	120,0		5
19	-45,0	5	3	50	-102,5		2
20	92,5	5	5	51	35,0		3
21	-130,0	0	0	52	172,5		0
22	7,5	3	0	53	-50,0		3
23	145,0	0	0	54	87,5		5
24	-77,5	6	5	55	-135,0		0
25	60,0	5	5	56	2,5		0
26	-162,5	-1	-2	57	140,0		0
27	-25,0	5	0	58	-82,5		5
28	112,5	3	4	59	55,0		5
29	-110,0	5	2	60	-167,5		-2
30	27,5	3	2	61	-30,0		0
31	165,0	0	0				

Tabela A3 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 16, 21, 25 e 31 células FV do modelo M1, para a cidade de Chuí - RS

Célula	γ (°)	β (°)			
		M1_16C	M1_21C	M1_25C	M1_31C
1	180,0	26	26	26	26
2	-42,5	-16	-16	-16	-15
3	95,0	5	7	8	8
4	-127,5	19	20	19	20
5	10,0	-20	-23	-20	-20
6	147,5	23	23	23	24
7	-75,0	-5	-3	-5	-2
8	62,5	-10	-5	-10	-10
9	-160,0	25	25	25	25
10	-22,5	-20	-22	-20	-20
11	115,0	15	15	15	15
12	-107,5	12	12	12	12
13	30,0	-20	-20	-20	-20
14	167,5	25	25	25	25
15	-55,0	-14	-12	-13	-14
16	82,5	1	0	0	0
17	-140,0		22	22	22
18	-2,5		-24	-25	-22
19	135,0		22	22	22
20	-87,5		2	1	2
21	50,0		-14	-16	-14
22	-172,5			25	25
23	-35,0			-19	-18
24	102,5			10	11
25	-120,0			17	17
26	17,5				-20
27	155,0				24
28	-67,5				-7
29	70,0				0
30	-152,5				23
31	-15,0				-20

Tabela A4 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 41 e 61 células do modelo M1, para a cidade de Chuí - MG

Célula	γ (°)	β (°)		Célula	γ (°)	β (°)	
		M1_41C	M1_61C			M1_41C	M1_61C
1	180,0	26	26	32	122,5	20	17
2	-42,5	-15	-16	33	-100,0	9	10
3	95,0	8	8	34	37,5	-22	-20
4	-127,5	20	22	35	175	25	25
5	10,0	-18	-16	36	-47,5	-15	-20
6	147,5	23	22	37	90,0	7	5
7	-75,0	0	0	38	-132,5	21	20
8	62,5	-10	-5	39	5,0	-22	-25
9	-160,0	25	23	40	142,5	23	20
10	-22,5	-20	-20	41	-80,0	1	0
11	115,0	15	15	42	57,5		-10
12	-107,5	12	14	43	-165,0		23
13	30,0	-20	-20	44	-27,5		-20
14	167,5	25	25	45	110,0		15
15	-55,0	-20	-10	46	-112,5		15
16	82,5	0	5	47	25,0		-25
17	-140,0	22	20	48	162,5		25
18	-2,5	-21	-25	49	-60,0		-10
19	135,0	22	20	50	77,5		0
20	-87,5	3	5	51	-145,0		20
21	50,0	-15	-20	52	-7,5		-20
22	-172,5	24	25	53	130,0		20
23	-35,0	-16	-20	54	-92,5		8
24	102,5	12	10	55	45,0		-20
25	-120,0	17	18	56	-177,5		25
26	17,5	-23	-25	57	-40,0		-20
27	155,0	23	22	58	97,5		10
28	-67,5	-5	-5	59	-125,0		20
29	70,0	0	0	60	12,5		-25
30	-152,5	25	25	61	150		22
31	-15,0	-20	-20				

Tabela A5 – Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores do modelo M1 para a cidade de Boa Vista - RR

Árvore	Radiação anual total (kWh/m ² /ano)	Perda por sombreamento (%)	Radiação média anual por célula FV (Wh/m ² /ano)	Redução da radiação média por célula FV(%)*	Redução da radiação média por célula FV(%)**
M1_16C	24,61	9,08	1538,00	9,18	9,20
M1_21C	31,50	11,34	1499,79	11,44	11,46
M1_25C	36,86	12,85	1474,22	12,95	12,97
M1_31C	44,69	14,77	1441,73	14,87	14,88
M1_41C	57,40	17,22	1400,07	17,33	17,34
M1_61C	81,78	20,72	1340,68	20,84	20,85

* Redução da radiação média anual por célula FV em relação a radiação anual de uma célula FV com inclinação igual a latitude ($\beta=|\varphi|$ e $\gamma=0^\circ$).

** Redução da radiação média anual por célula FV em relação a radiação anual de uma célula FV com inclinação otimizada ($\beta=4^\circ$ e $\gamma=0^\circ$).

Tabela A6 – Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores do modelo M1 para a cidade de Chuí - RS

Árvore	Radiação anual total (kWh/m ² /ano)	Perda por sombreamento (%)	Radiação média anual por célula FV (Wh/m ² /ano)	Redução da radiação média por célula FV(%)*	Redução da radiação média por célula FV(%)**
M1_16C	23,90	6,19	1493,90	9,22	9,90
M1_21C	30,91	7,47	1472,15	10,54	11,21
M1_25C	36,48	8,32	1459,22	11,32	11,99
M1_31C	44,49	9,92	1431,09	12,79	13,44
M1_41C	57,56	11,78	1403,85	14,69	15,33
M1_61C	82,31	15,24	1349,40	18,00	18,61

* Redução da radiação média anual por célula FV em relação a radiação anual de uma célula FV com inclinação igual a latitude ($\beta=|\varphi|$ e $\gamma=180^\circ$).

** Redução da radiação média anual por célula FV em relação a radiação anual de uma célula FV com inclinação otimizada ($\beta=26^\circ$ e $\gamma=180^\circ$).

Tabela A7 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 16 e 21 células FV do modelo M2, para a cidade de Viçosa - MG

Célula	M2_16C_5		M2_16C_6		M2_21C_5		M2_21C_6	
	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
1	180	21	180	21	180,0	21	180,0	21
2	0	-17	0	-17	0,0	-17	0,0	-17
3	-60	-10	0	-20	-60,0	-10	-60,0	-10
4	60	-7	180	20	60,0	-7	60,0	-8
5	180	20	-60	-10	180,0	20	180,0	20
6	-60	-10	60	-10	-90,0	0	-60,0	-10
7	60	-10	180	20	0,0	-20	60,0	-9
8	180	20	-60	-10	90,0	0	180,0	20
9	-90	0	60	-10	180,0	20	-90,0	0
10	0	-20	180	20	-108,0	10	0,0	-20
11	90	0	-60	-9	-36,0	-10	90,0	0
12	180	20	60	-10	36,0	-13	180,0	20
13	180	20	180	21	108,0	10	-90,0	0
14	-90	0	-102	6	180,0	20	0,0	-20
15	0	-18	18	-17	-164,0	20	90,0	0
16	90	0	138	17	-112,6	9	180,0	20
17					-61,1	-8	-143,0	18
18					-9,7	-17	-71,0	-6
19					41,7	-14	1,0	-18
20					93,1	2	73,0	-5
21					144,6	18	145,0	17

Tabela A8 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 25 e 41 células FV do modelo M2, para a cidade de Viçosa - MG

Célula	M2_25C_5		M2_25C_6		M2_41C_5		M2_41C_6	
	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
1	180,0	21	180,0	21	180,0	21	180,0	21
2	0,0	-17	0,0	-17	0,0	-17	0,0	-17
3	-90,0	0	-60,0	-10	-108,0	8	-90,0	0
4	0,0	-20	60,0	-8	-36,0	-14	0,0	-20
5	90,0	0	180,0	20	36,0	-13	90,0	0
6	180,0	20	-90,0	0	108,0	10	180,0	20
7	-108,0	8	0,0	-20	180,0	20	-120,0	10
8	-36,0	-15	90,0	0	-135,0	16	-60,0	-10
9	36,0	-14	180,0	20	-90,0	0	0,0	-15
10	108,0	10	-108,0	10	-45,0	-10	60,0	-10
11	180,0	20	-36,0	-10	0,0	-17	120,0	10
12	-120,0	10	36,0	-15	45,0	-14	180,0	20
13	-60,0	-10	108,0	10	90,0	0	-135,0	16
14	0,0	-17	180,0	20	135,0	20	-90,0	0
15	60,0	-10	-108,0	8	180,0	19	-45,0	-10
16	120,0	10	-36,0	-16	-148,0	19	0,0	-17
17	180,0	20	36,0	-14	-115,3	10	45,0	-13
18	-158,0	19	108,0	10	-82,5	-2	90,0	0
19	-113,0	10	180,0	20	-49,8	-12	135,0	20
20	-68,0	-7	-152,0	19	-17,1	-16	180,0	19
21	-23,0	-17	-92,0	1	15,6	-17	-144,0	18
22	22,0	-16	-32,0	-17	48,4	-13	-108,0	10
23	67,0	-7	28,0	-16	81,1	-3	-72,0	-10
24	112,0	9	88,0	-1	113,8	9	-36,0	-14
25	157,0	18	148,0	18	146,5	17	0,0	-16
26					179,3	20	36,0	-18
27					-164,0	20	72,0	-8
28					-140,0	17	108,0	10
29					-116,0	10	144,0	15
30					-92,0	1	180,0	19
31					-68,0	-7	180,0	20
32					-44,0	-14	-147,3	18
33					-20,0	-16	-114,5	10
34					4,0	-18	-81,8	0
35					28,0	-16	-49,1	-10
36					52,0	-12	-16,4	-20
37					76,0	-5	16,4	-19
38					100,0	4	49,1	-14
39					124,0	12	81,8	-3
40					148,0	18	114,5	10
41					172,0	19	147,3	17

Tabela A9 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 16, 21 e 25 células FV do modelo M2, para a cidade de Boa Vista – RR

Célula	M2_16C_5		M2_16C_6		M2_21C_5		M2_21C_6		M2_25C_5		M2_25C_6	
	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
1	0	4	0	4	0,0	4	0,0	4	0	4	0,0	4
2	180	-1	180	-1	180,0	-1	180,0	-1	180	-1	180,0	-1
3	120	0	180	-1	120,0	0	120,0	-1	90	1	120,0	-1
4	-120	0	0	3	-120,0	0	-120,0	-1	180	-1	-120,0	-1
5	0	4	120	-1	0,0	4	0,0	4	-90	1	0,0	4
6	120	0	-120	-1	90,0	1	120,0	-1	0	4	90,0	1
7	-120	0	0	3	180,0	0	-120,0	-1	72	1	180,0	0
8	0	4	120	-1	-90,0	1	0,0	4	144	0	-90,0	1
9	90	0	-120	-2	0,0	4	90,0	1	-144	0	0,0	4
10	180	-1	0	4	72,0	1	180,0	0	-72	1	72,0	2
11	-90	0	120	-1	144,0	0	-90,0	1	0	5	144,0	-1
12	0	5	-120	-1	-144,0	0	0,0	4	60	2	-144,0	-1
13	0	5	0	4	-72,0	1	90,0	1	120	0	-72,0	2
14	90	0	47	3	0,0	5	180,0	0	180	0	0,0	5
15	180	-1	167	0	25,0	4	-90,0	1	-120	0	72,0	1
16	-90	0	-73	2	76,4	1	0,0	5	-60	2	144,0	0
17					127,9	0	0,0	5	0	5	-144,0	0
18					179,3	0	72,0	1	28	4	-72,0	1
19					-129,3	-1	144,0	-1	73	1	0,0	5
20					-77,9	1	-144,0	-1	118	-1	33,0	4
21					-26,4	4	-72,0	1	163	0	93,0	-1
22									-152	0	153,0	-1
23									-107	-1	-147,0	-1
24									-62	2	-87,0	-1
25									-17	4	-27,0	4

Tabela A10 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 31, 41 e 61 células FV do modelo M2, Boa Vista – RR

Cél.	M2_31C_5		M2_31C_6		M2_41C_5		M2_41C_6		M2_61C_5		M2_61C_6	
	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
1	0,0	4	0,0	4	0,0	4	0,0	4	0,0	4	0,0	4
2	180,0	-1	180,0	-1	180,0	-1	180,0	-1	180,0	-1	180,0	-1
3	90,0	1	120,0	-1	72,0	2	90,0	2	51,0	3	72,0	2
4	180,0	-1	-120,0	-1	144,0	0	180,0	-2	102,4	1	144,0	0
5	-90,0	1	0,0	4	-144,0	0	-90,0	2	153,9	0	-144,0	0
6	0,0	4	72,0	2	-72,0	2	0,0	4	-154,7	0	-72,0	2
7	60,0	2	144,0	0	0,0	4	60,0	2	-103,3	1	0,0	4
8	120,0	-1	-144,0	0	45,0	4	120,0	0	-51,9	3	40,0	3
9	180,0	-1	-72,0	2	90,0	1	180,0	0	-0,4	4	80,0	1
10	-120,0	-1	0,0	4	135,0	0	-120,0	0	30,0	4	120,0	-1
11	-60,0	2	60,0	1	180,0	0	-60,0	2	60,0	2	160,0	-1
12	0,0	5	120,0	-2	-135,0	0	0,0	5	90,0	0	-160,0	-1
13	45,0	3	180,0	0	-90,0	1	45,0	3	120,0	0	-120,0	-1
14	90,0	0	-120,0	0	-45,0	4	90,0	0	150,0	0	-80,0	1
15	135,0	-1	-60,0	3	0,0	5	135,0	-1	180,0	0	-40,0	3
16	180,0	0	0,0	5	32,0	4	180,0	0	-150,0	0	0,0	5
17	-135,0	-1	51,0	3	64,7	2	-135,0	-1	-120,0	0	30,0	3
18	-90,0	0	102,4	-2	97,5	-2	-90,0	0	-90,0	0	60,0	2
19	-45,0	3	153,9	-1	130,2	0	-45,0	3	-60,0	2	90,0	-1
20	0,0	5	-154,7	-2	162,9	-1	0,0	5	-30,0	4	120,0	-2
21	0,0	5	-103,3	-2	-164,4	0	36,0	3	0,0	6	150,0	0
22	32,7	4	-51,9	2	-131,6	0	72,0	1	21,0	4	180,0	0
23	65,5	1	-0,4	5	-98,9	-2	108,0	-1	42,2	3	-150,0	0
24	98,2	0	34,0	3	-66,2	2	144,0	-1	63,4	2	-120,0	-2
25	130,9	-1	79,0	0	-33,5	4	180,0	0	84,5	-1	-90,0	-1
26	163,6	0	124,0	-1	-0,7	5	-144,0	-1	105,7	-1	-60,0	2
27	-163,6	0	169,0	1	16,0	5	-108,0	-1	126,9	-1	-30,0	3
28	-130,9	-1	-146,0	0	40,0	4	-72,0	1	148,1	-1	0,0	4
29	-98,2	0	-101,0	-1	64,0	2	-36,0	3	169,2	0	24,0	4
30	-65,5	1	-56,0	2	88,0	-1	0,0	4	-169,6	0	48,0	3
31	-32,7	4	-11,0	4	112,0	0	0,0	5	-148,4	-1	72,0	-1
32					136,0	-1	32,7	3	-127,2	-1	96	-2
33					160,0	0	65,5	1	-106,1	-1	120	-2
34					-176,0	0	98,2	-2	-84,9	-1	144	-1
35					-152,0	0	130,9	-1	-63,7	2	168	0
36					-128,0	-1	163,6	0	-42,5	3	-168	0
37					-104,0	-1	-163,6	0	-21,4	4	-144	-1
38					-80,0	0	-130,9	0	-0,2	4	-120	-2
39					-56,0	2	-98,2	-2	8,0	5	-96	-2
40					-32,0	4	-65,5	1	23,7	4	-72	0
41					-8,0	5	-32,7	3	39,3	4	-48	3
42									55,0	2	-24	4
43									70,6	0	0	5
44									86,3	-1	0	6
45									101,9	-1	20	5
46									117,6	-1	40	3
47									133,2	-1	60	0
48									148,9	-1	80	0
49									164,5	0	100	-4
50									-179,8	2	120	-2
51									-164,2	0	140	-1
52									-148,5	-1	160	0
53									-132,9	-1	180	1
54									-117,2	-1	-160	-1
55									-101,6	-1	-140	0
56									-85,9	-1	-120	-1
57									-70,3	0	-100	-3
58									-54,6	2	-80	-2
59									-39,0	4	-60	0
60									-23,3	4	-40	3
61									-7,7	5	-20	5

Tabela A11 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 16, 21 e 25 células FV do modelo M2, para a cidade de Chuí - RS

Célula	M2_16C_5		M2_16C_6		M2_21C_5		M2_21C_6		M2_25C_5		M2_25C_6	
	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
1	180	26	180	26	180,0	26	180,0	26	180,0	26	180,0	26
2	0	-22	0	-22	0,0	-22	0,0	-22	0,0	-22	0,0	-22
3	-60	-10	0	-20	-60,0	-10	-60,0	-10	-90,0	0	-60,0	-10
4	60	-12	180	30	60,0	-12	60,0	-12	0,0	-20	60,0	-12
5	180	25	-60	-10	180,0	25	180,0	30	90,0	0	180,0	30
6	-60	-10	60	-13	-90,0	0	-60,0	-10	180,0	20	-90,0	0
7	60	-12	180	20	0,0	-21	60,0	-13	-108,0	10	0,0	-20
8	180	26	-60	-10	90,0	0	180,0	30	-36,0	-16	90,0	0
9	-90	0	60	-13	180,0	25	-90,0	0	36,0	-19	180,0	20
10	0	-21	180	30	-108,0	10	0,0	-20	108,0	10	-108,0	10
11	90	0	-60	-10	-36,0	-20	90,0	0	180,0	24	-36,0	-20
12	180	24	60	-13	36,0	-21	180,0	20	-120,0	13	36,0	-19
13	-148	23	180	30	108,0	10	-90,0	0	-60,0	-10	108,0	10
14	-58	-13	180	30	180,0	20	0,0	-20	0,0	-23	180,0	20
15	32	-20	-60	-10	180,0	26	90,0	0	60,0	-11	-108,0	10
16	122	16	60	-10	-128,6	20	180,0	20	120,0	13	-36,0	-20
17					-77,1	-10	180,0	30	180,0	24	36,0	-20
18					-25,7	-20	-108,0	10	-156,0	24	108,0	10
19					25,7	-20	-36,0	-20	-111,0	12	180,0	20
20					77,1	-10	36,0	-20	-66,0	-11	180,0	30
21					128,6	20	108,0	10	-21,0	-21	-120,0	20
22									24,0	-20	-60,0	-10
23									69,0	-10	0,0	-22
24									114,0	12	60,0	-10
25									159,0	23	120,0	20

Tabela A12 – Ângulos de inclinação (β) e de azimute (γ) das células FV para as árvores de 31, 41 e 61 células FV do modelo M2, Chuí – RS

Célula	M2_31C_5		M2_31C_6		M2_41C_5		M2_41C_6		M2_61C_5		M2_61C_6	
	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\gamma(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$
1	180,0	26	180,0	26	180,0	26	180,0	26	180,0	26	180,0	26
2	0,0	-22	0,0	-22	0,0	-22	0,0	-22	0,0	-22	0,0	-22
3	-90,0	0	-60,0	-10	-108,0	10	-90,0	0	-129,0	19	-108,0	10
4	0,0	-20	60,0	-12	-36,0	-17	0,0	-20	-77,6	-1	-36,0	-20
5	90,0	0	180,0	30	36,0	-17	90,0	0	-26,1	-18	36,0	-18
6	180,0	20	-108,0	10	108,0	10	180,0	20	25,3	-20	108,0	10
7	-120,0	16	-36,0	-20	180,0	24	-120,0	20	76,7	-5	180,0	24
8	-60,0	-10	36,0	-20	-135,0	21	-60,0	-10	128,1	18	-140,0	22
9	0,0	-20	108,0	10	-90,0	2	0,0	-20	179,6	24	-100,0	10
10	60,0	-12	180,0	20	-45,0	-14	60,0	-16	-150,0	24	-60,0	-10
11	120,0	20	-120,0	20	0,0	-20	120,0	20	-120,0	18	-20,0	-15
12	180,0	23	-60,0	-10	45,0	-19	180,0	23	-90,0	5	20,0	-21
13	-135,0	21	0,0	-20	90,0	1	-135,0	20	-60,0	-10	60,0	-16
14	-90,0	0	60,0	-14	135,0	20	-90,0	0	-30,0	-17	100,0	0
15	-45,0	-16	120,0	10	180,0	23	-45,0	-20	0,0	-20	140,0	15
16	0,0	-21	180,0	23	-148,0	23	0,0	-21	30,0	-22	180,0	22
17	45,0	-18	-129,0	20	-115,3	13	45,0	-18	60,0	-12	-150,0	23
18	90,0	0	-77,6	0	-82,5	0	90,0	0	90,0	0	-120,0	18
19	135,0	19	-26,1	-15	-49,8	-13	135,0	20	120,0	10	-90,0	5
20	180,0	24	25,3	-22	-17,1	-19	180,0	23	150,0	19	-60,0	-10
21	180,0	26	76,7	-10	15,6	-20	-144,0	22	180,0	23	-30,0	-17
22	-147,3	23	128,1	10	48,4	-17	-108,0	10	-159,0	24	0,0	-20
23	-114,5	14	179,6	22	81,1	-7	-72,0	-10	-137,8	21	30,0	-22
24	-81,8	0	180,0	26	113,8	10	-36,0	-15	-116,6	14	60,0	-17
25	-49,1	-15	-135,0	20	146,5	20	0,0	-22	-95,5	5	90,0	0
26	-16,4	-20	-90,0	0	179,3	22	36,0	-22	-74,3	-6	120,0	10
27	16,4	-21	-45,0	-20	180,0	26	72,0	-10	-53,1	-14	150,0	20
28	49,1	-18	0,0	-23	-156,0	23	108,0	10	-31,9	-18	180,0	21
29	81,8	0	45,0	-17	-132,0	20	144,0	15	-10,8	-22	-156,0	24
30	114,5	10	90,0	0	-108,0	10	180,0	22	10,4	-22	-132,0	20
31	147,3	21	135,0	20	-84,0	-2	-167,0	25	31,6	-22	-108,0	10
32					-60,0	-10	-134,3	19	52,8	-17	-84	-1
33					-36,0	-19	-101,5	5	73,9	-9	-60	-11
34					-12,0	-22	-68,8	-10	95,1	1	-36	-19
35					12,0	-22	-36,1	-21	116,3	11	-12	-23
36					36,0	-21	-3,4	-24	137,5	17	12	-23
37					60,0	-15	29,4	-23	158,6	22	36	-22
38					84,0	-4	62,1	-14	179,8	23	60	-13
39					108,0	10	94,8	2	-175,0	26	84	-8
40					132,0	18	127,5	17	-159,3	24	108	5
41					156,0	23	160,3	22	-143,7	22	132	15
42									-128,0	18	156	21
43									-112,4	12	180	22
44									-96,7	4	180	26
45									-81,1	-3	-160	23
46									-65,4	-11	-140	21
47									-49,8	-16	-120	13
48									-34,1	-19	-100	4
49									-18,5	-21	-80	-10
50									-2,8	-22	-60	-15
51									12,8	-22	-40	-22
52									28,5	-22	-20	-21
53									44,1	-21	0	-23
54									59,8	-15	20	-23
55									75,4	-8	40	-23
56									91,1	0	60	-15
57									106,7	7	80	-5
58									122,4	14	100	4
59									138,0	19	120	10
60									153,7	22	140	18
61									169,3	24	160	23

Tabela A13 - Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores do modelo M2 para a cidade de Boa Vista – RR

Árvore	Radiação anual total (kWh/m ² /ano)	Perda por sombreamento (%)	Radiação média anual por célula FV (Wh/m ² /ano)	Redução da radiação média anual por célula FV (%) *
M2_16C_5	25,56	5,56	1597,55	5,67
M2_16C_6	25,39	6,17	1587,37	6,27
M2_21C_5	33,31	6,23	1586,18	6,34
M2_21C_6	33,03	7,02	1572,85	7,13
M2_25C_5	39,43	6,76	1577,25	6,87
M2_25C_6	39,10	7,54	1564,08	7,64
M2_31C_5	48,65	7,23	1569,33	7,33
M2_31C_6	47,99	8,48	1548,07	8,59
M2_41C_5	63,70	8,15	1553,68	8,26
M2_41C_6	62,97	9,21	1535,74	9,32
M2_61C_5	93,92	8,98	1539,67	9,09
M2_61C_6	91,53	11,29	1500,43	11,40

* Redução da radiação média anual por célula FV em relação a radiação anual em uma célula FV com inclinação otimizada.

Tabela A14 - Radiação solar anual total incidente e radiação média por célula FV nas árvores do modelo M2 para a cidade de Chuí – RS

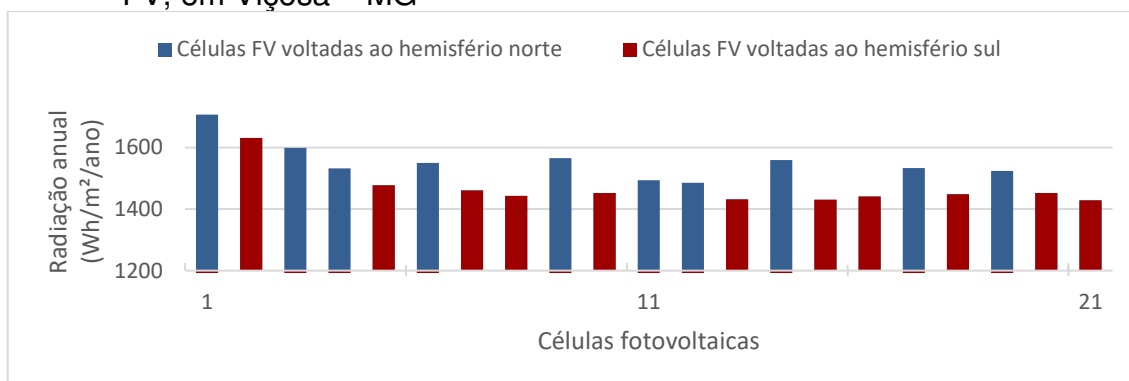
Árvore	Radiação anual total (kWh/m ² /ano)	Perda por sombreamento (%)	Radiação média anual por célula FV (Wh/m ² /ano)	Redução da radiação média anual por célula FV (%) *
M2_16C_5	24,33	4,78	1520,60	7,59
M2_16C_6	24,31	5,13	1519,44	7,66
M2_21C_5	31,78	5,13	1513,19	8,04
M2_21C_6	31,55	5,73	1502,60	8,69
M2_25C_5	37,60	5,69	1503,82	8,61
M2_25C_6	37,30	6,37	1492,11	9,33
M2_31C_5	46,35	6,20	1495,04	9,15
M2_31C_6	45,91	7,06	1481,12	9,99
M2_41C_5	60,85	6,87	1484,07	9,81
M2_41C_6	60,15	7,89	1467,07	10,85
M2_61C_5	89,59	7,78	1468,65	10,75
M2_61C_6	88,34	9,04	1448,12	12,00

* Redução da radiação média anual por célula FV em relação a radiação anual em uma célula FV com inclinação otimizada.

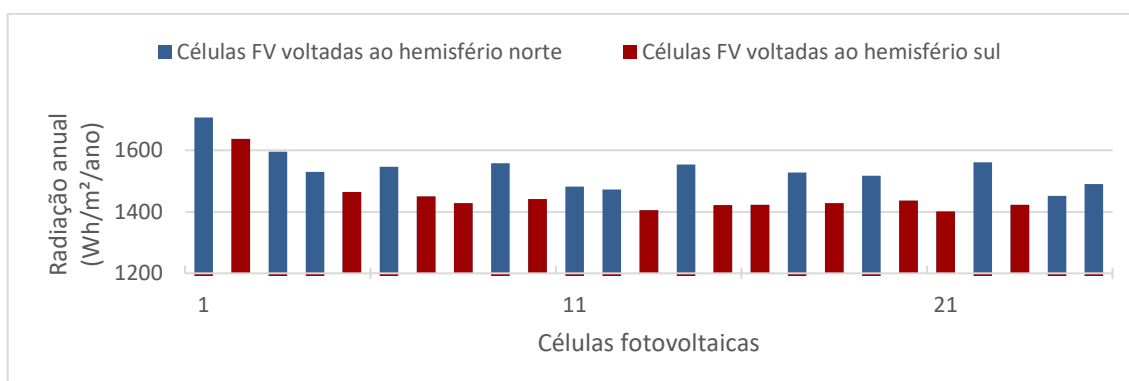
APÊNDICE B

Radiação solar anual em cada célula FV para as árvores simuladas

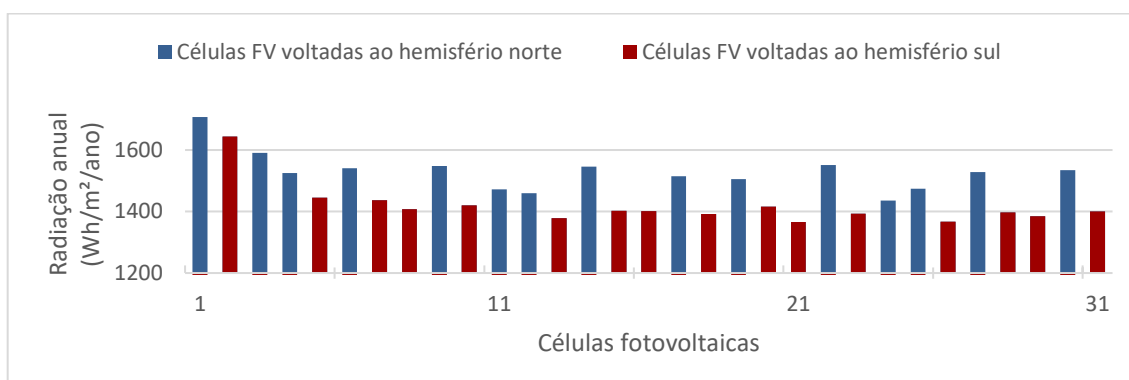
Figura B1 - Radiação solar anual em cada célula FV para as árvores do modelo M1 com (a) 21 células FV; (b) 25 células FV; (c) 31 células FV; e (d) 41 células FV, em Viçosa – MG



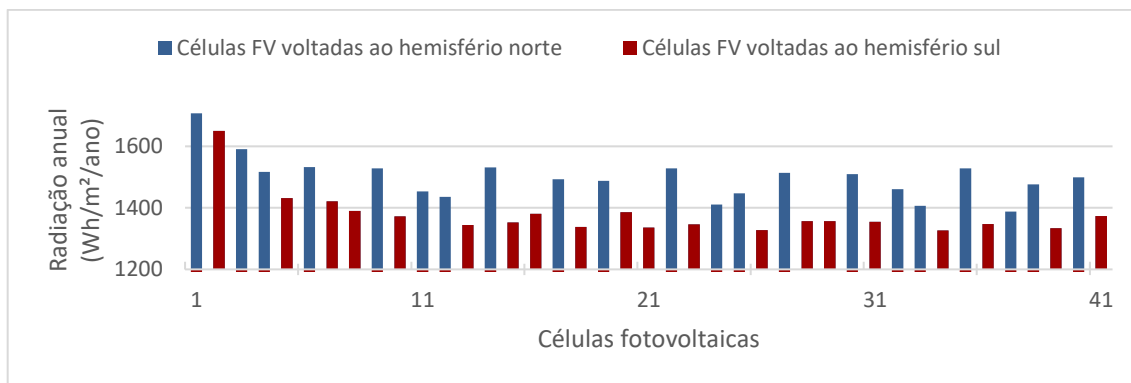
(a)



(b)

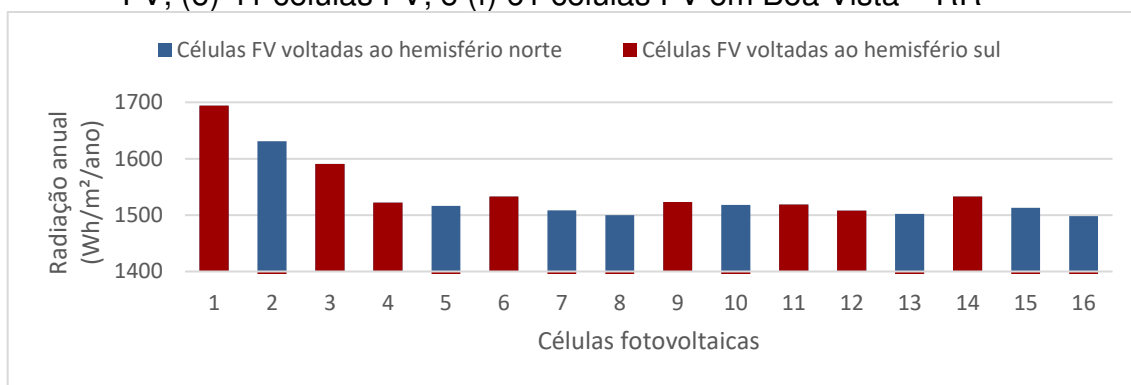


(c)

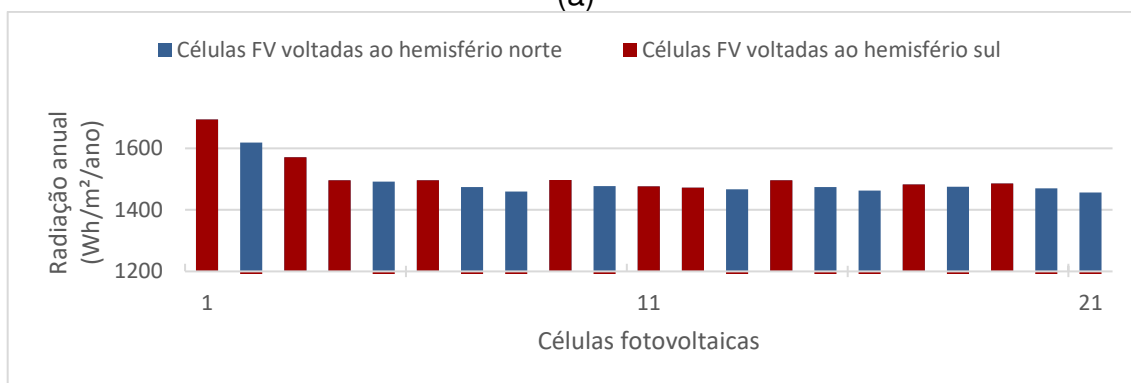


(d)

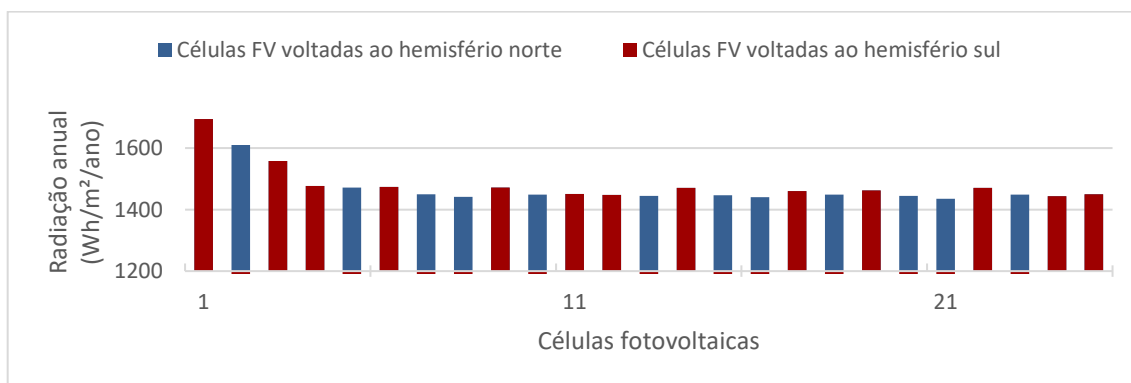
Figura B2 - Radiação solar anual em cada célula FV para as árvores do modelo M1 com (a) 16 células FV; (b) 21 células FV; (c) 25 células FV; (d) 31 células FV; (e) 41 células FV; e (f) 61 células FV em Boa Vista – RR



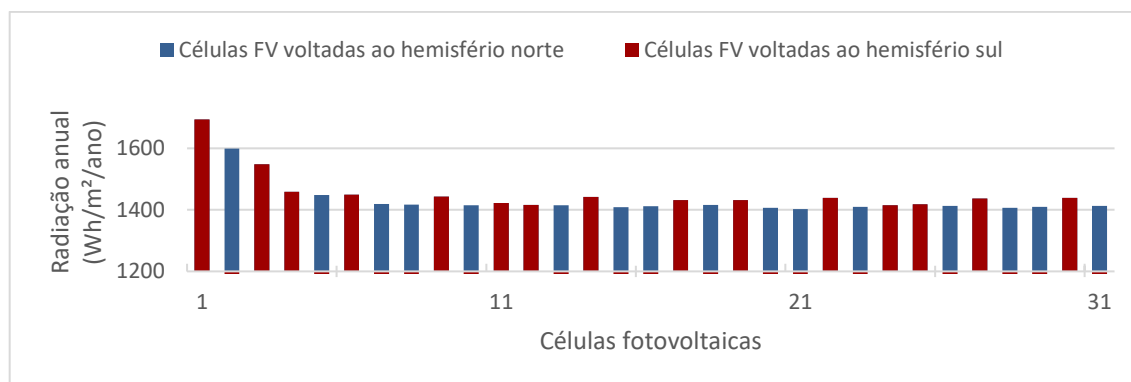
(a)



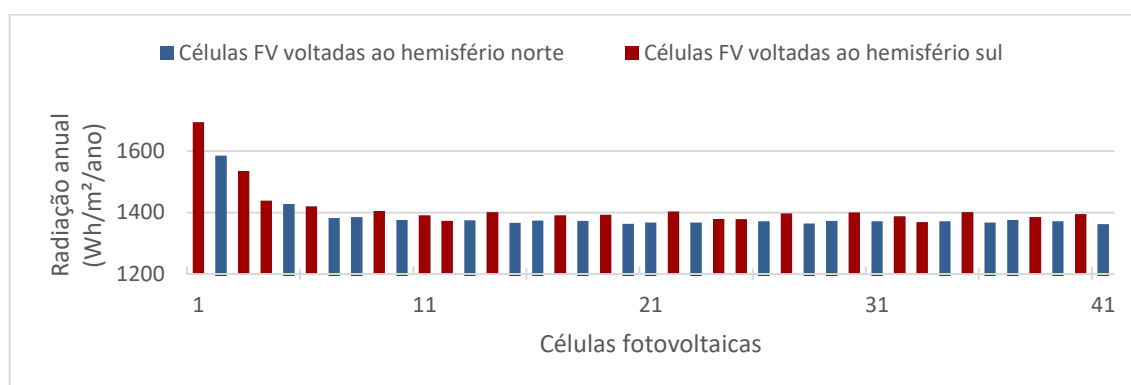
(b)



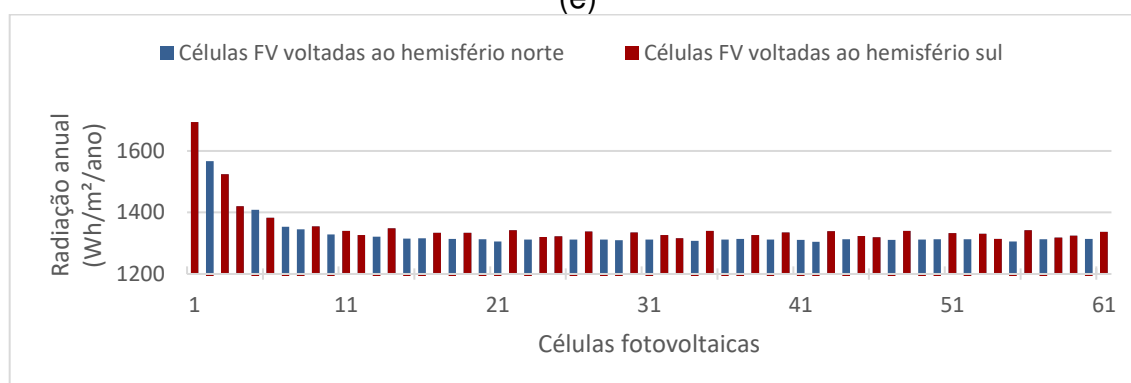
(c)



(d)

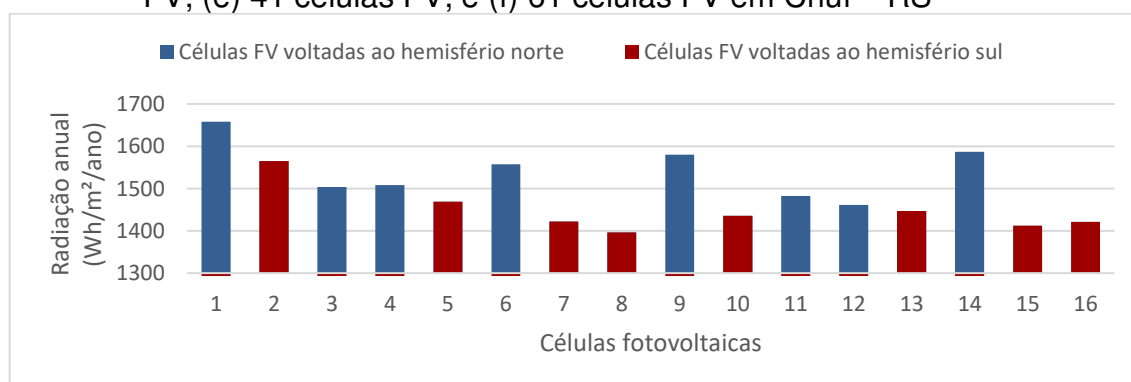


(e)

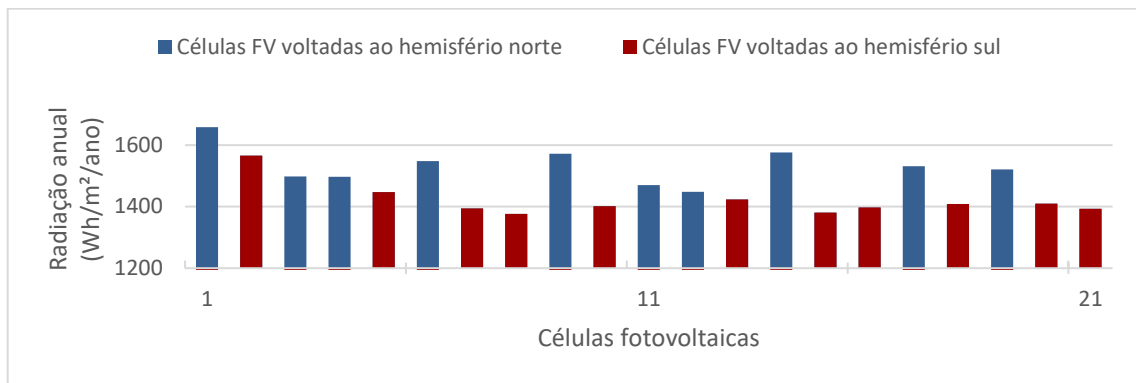


(f)

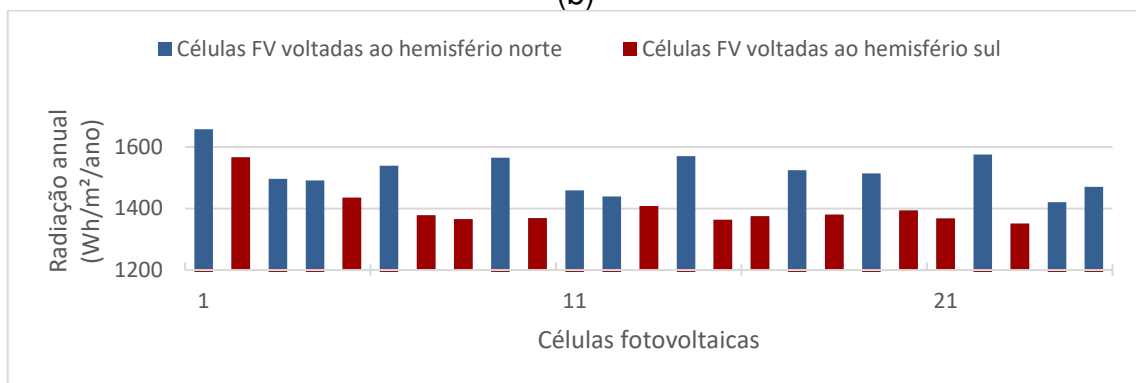
Figura B3 - Radiação solar anual em cada célula FV para as árvores do modelo M1 com (a) 16 células FV; (b) 21 células FV; (c) 25 células FV; (d) 31 células FV; (e) 41 células FV; e (f) 61 células FV em Chuí – RS



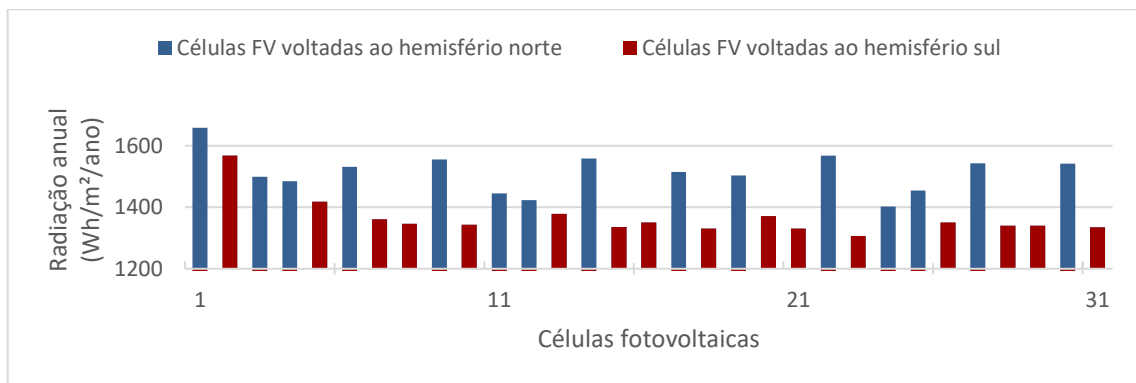
(a)



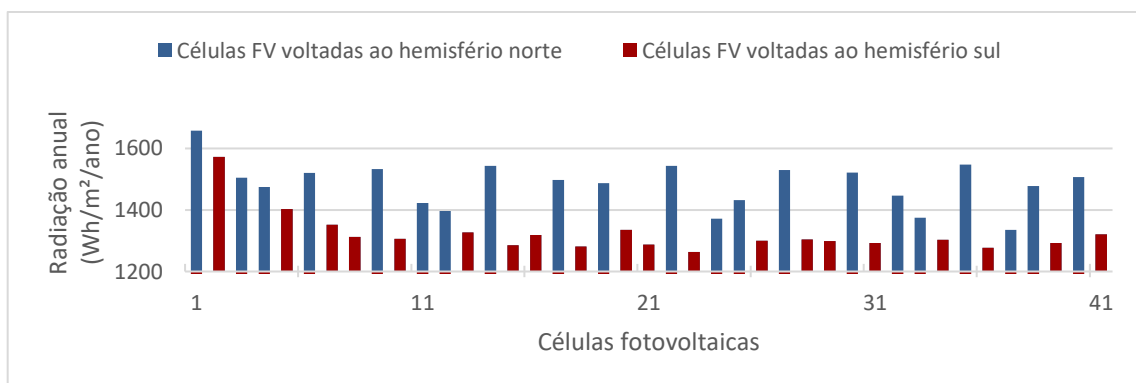
(b)



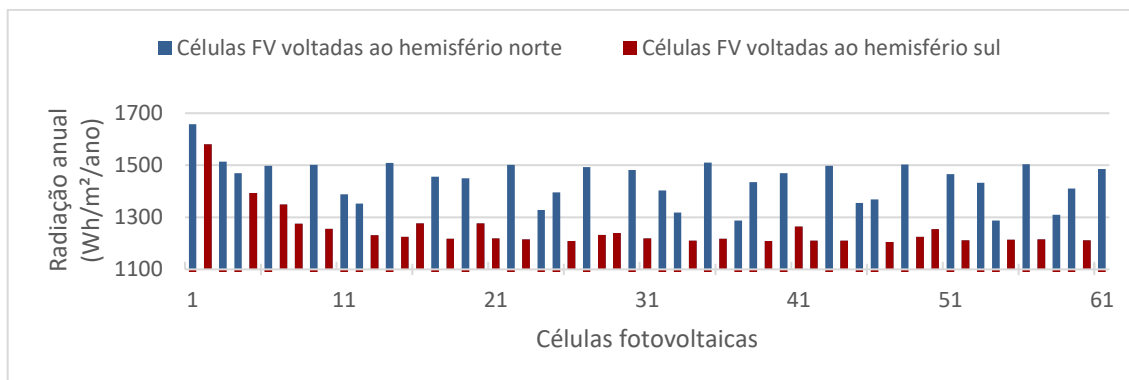
(c)



(d)

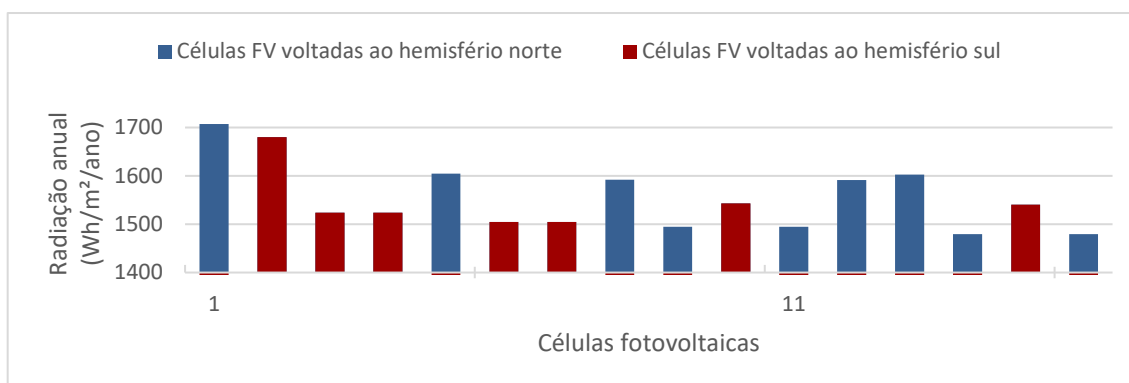


(e)

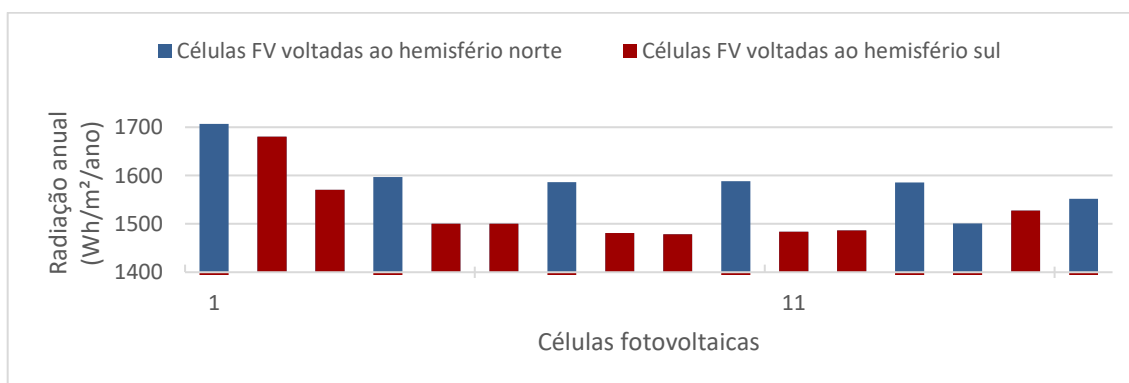


(f)

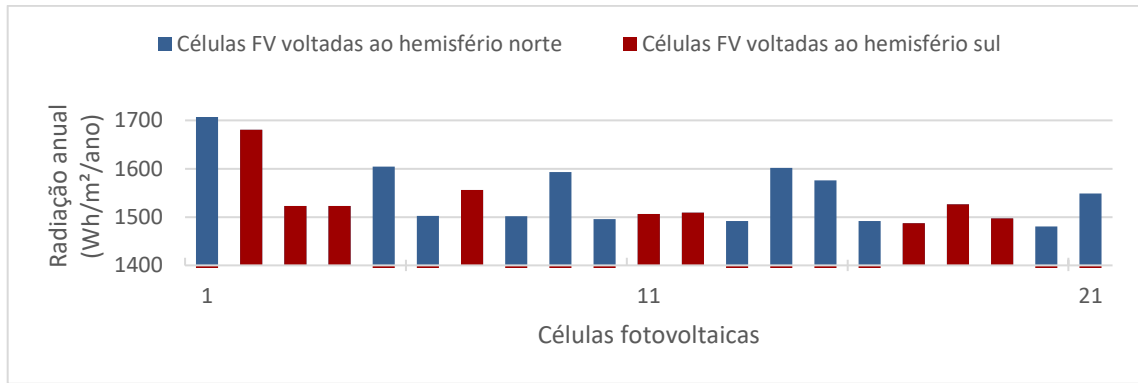
Figura B4 - Radiação solar anual em cada célula FV para as árvores do modelo M2 com (a) 16 células FV, 5 camadas; (b) 16 células FV, 6 camadas; (c) 21 células FV, 5 camadas; (d) 21 células FV, 6 camadas; (e) 25 células FV, 5 camadas; (f) 25 células FV, 6 camadas; (g) 31 células FV, 5 camadas; (h) 31 células FV, 6 camadas; (i) 41 células FV, 5 camadas; (j) 41 células FV, 6 camadas; (k) 61 células FV, 5 camadas; e (l) 61 células FV, 6 camadas, em Viçosa – MG



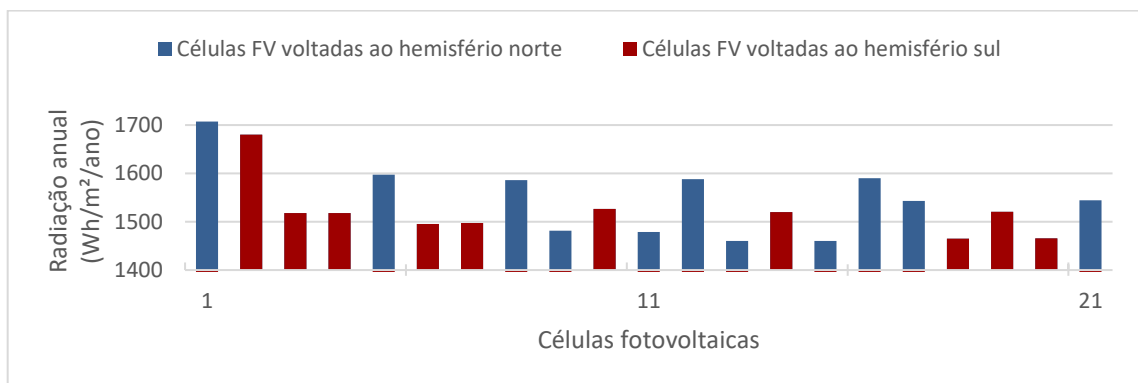
(a)



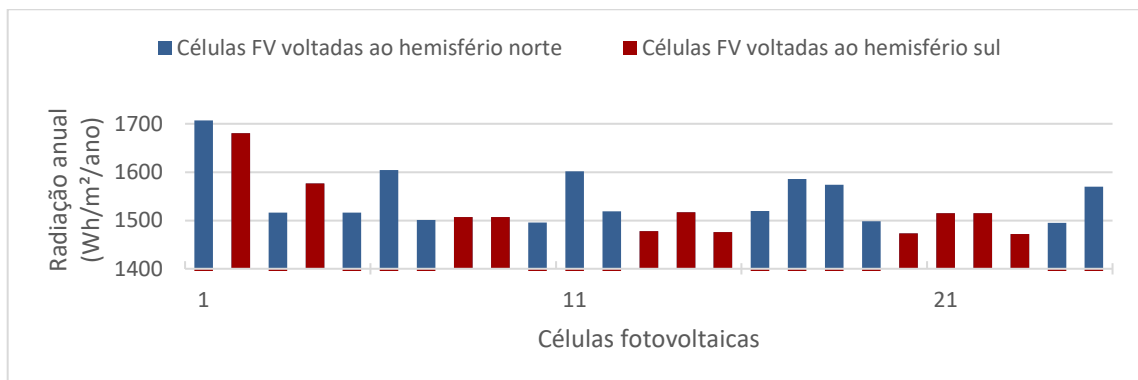
(b)



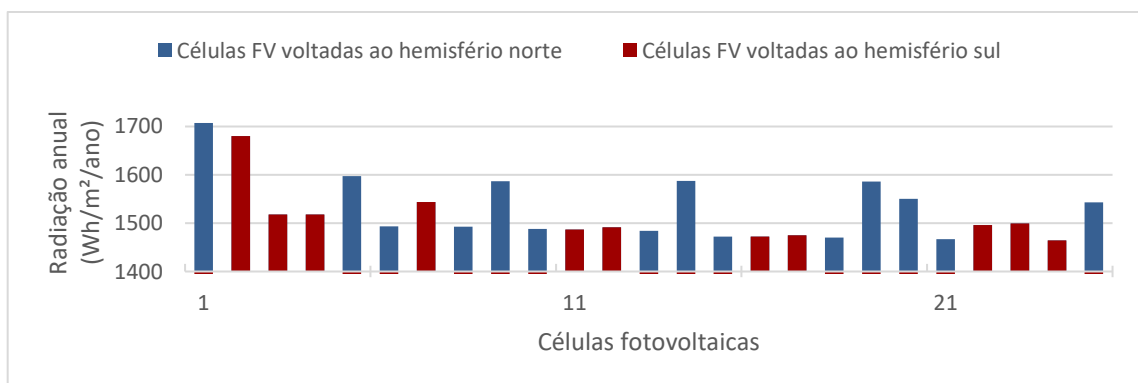
(c)



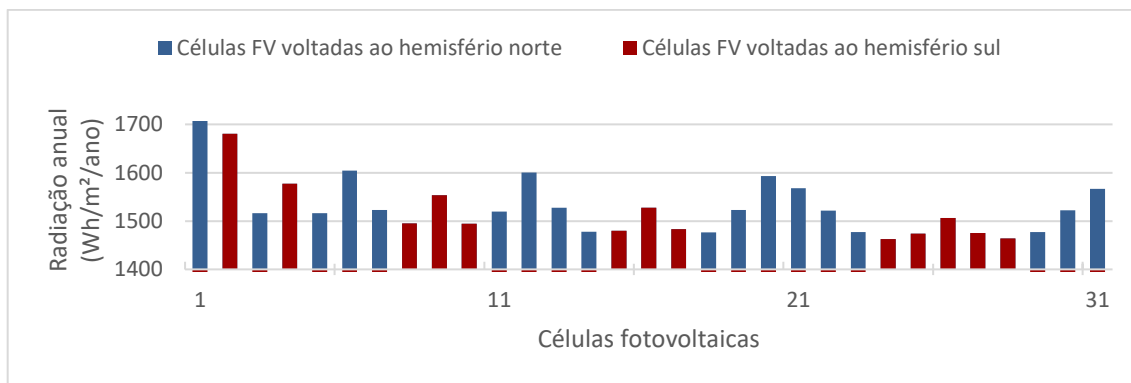
(d)



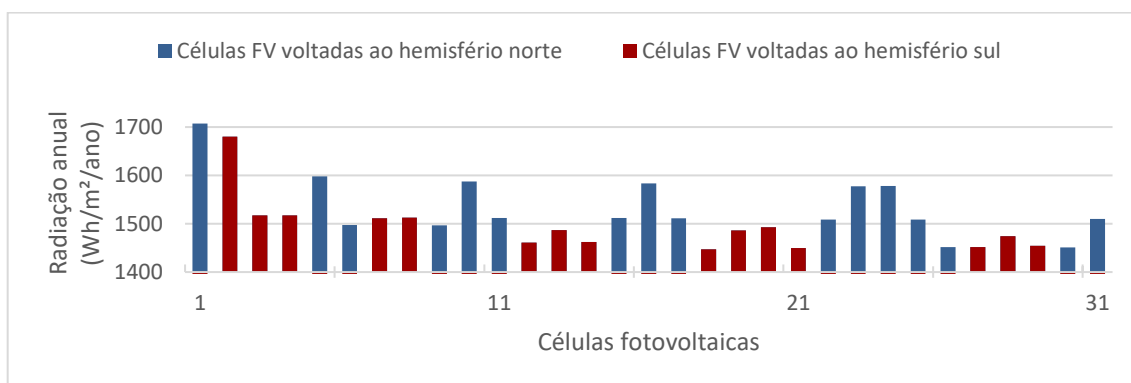
(e)



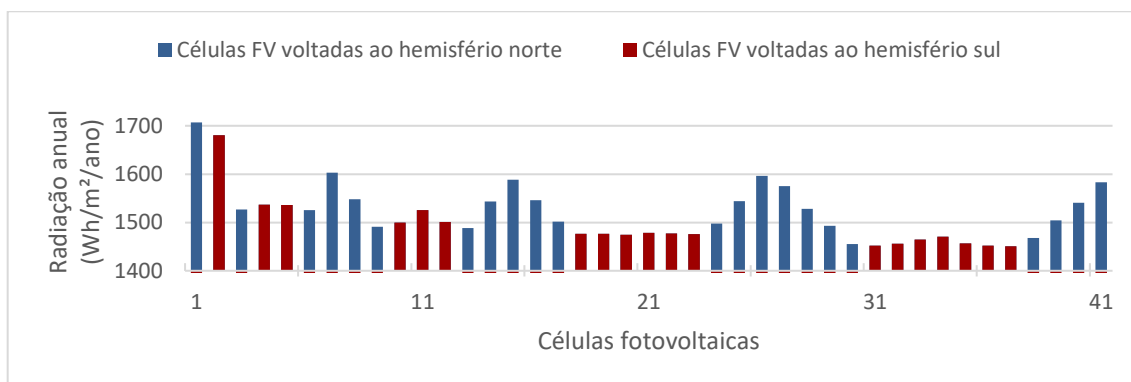
(f)



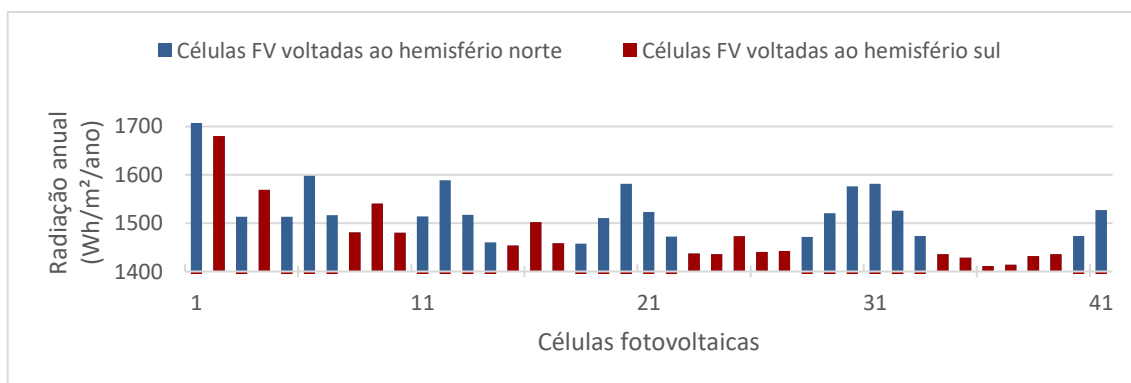
(g)



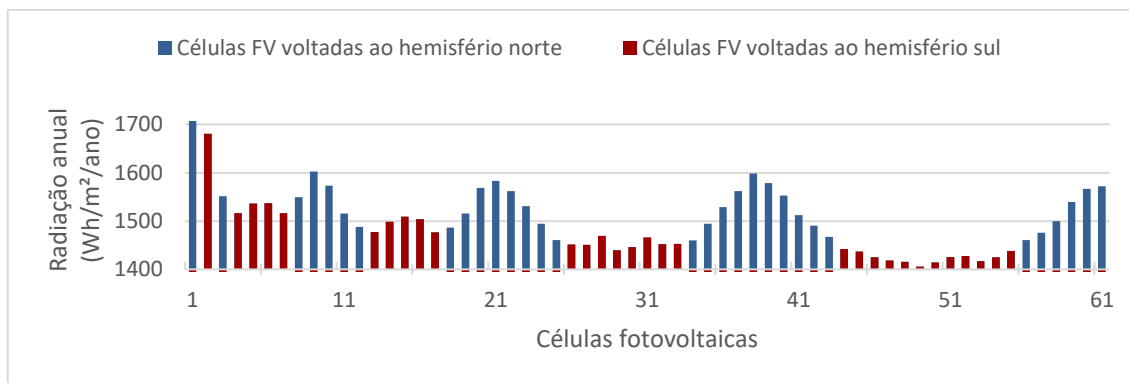
(h)



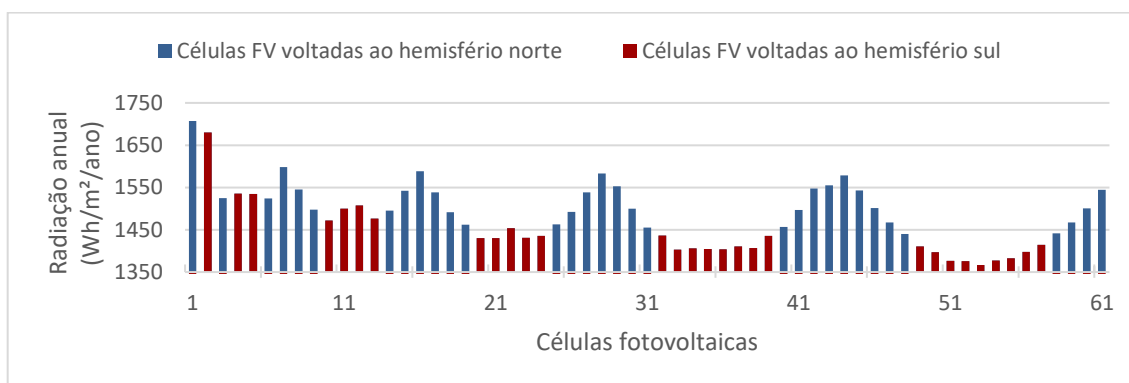
(i)



(j)

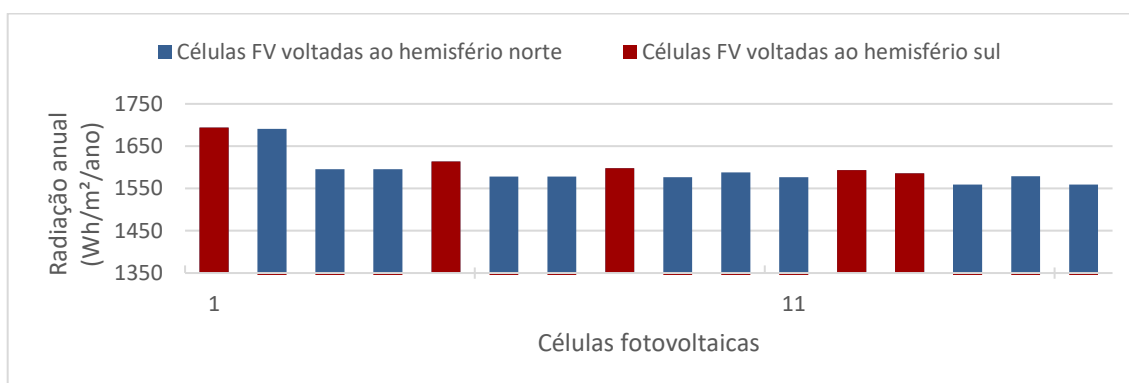


(k)

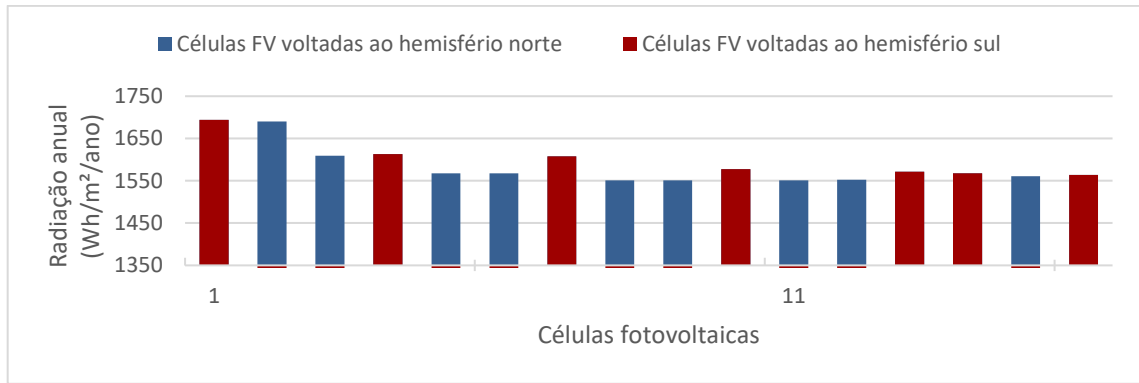


(l)

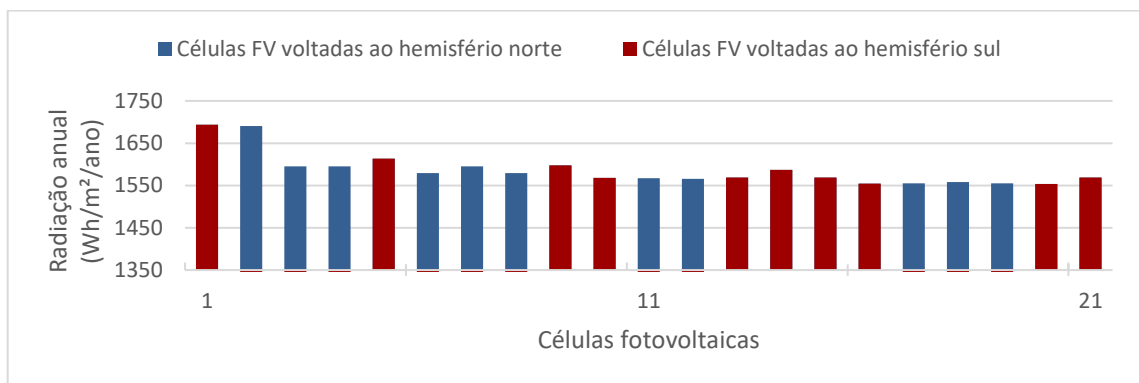
Figura B5 - Radiação solar anual em cada célula FV para as árvores do modelo M2 com (a) 16 células FV, 5 camadas; (b) 16 células FV, 6 camadas; (c) 21 células FV, 5 camadas; (d) 21 células FV, 6 camadas; (e) 25 células FV, 5 camadas; (f) 25 células FV, 6 camadas; (g) 31 células FV, 5 camadas; (h) 31 células FV, 6 camadas; (i) 41 células FV, 5 camadas; (j) 41 células FV, 6 camadas; (k) 61 células FV, 5 camadas; e (l) 61 células FV, 6 camadas, em Boa Vista – RR



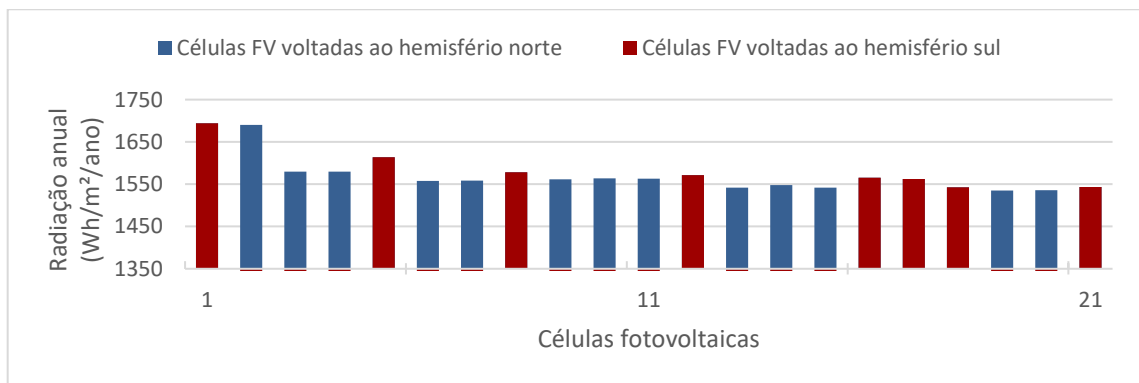
(a)



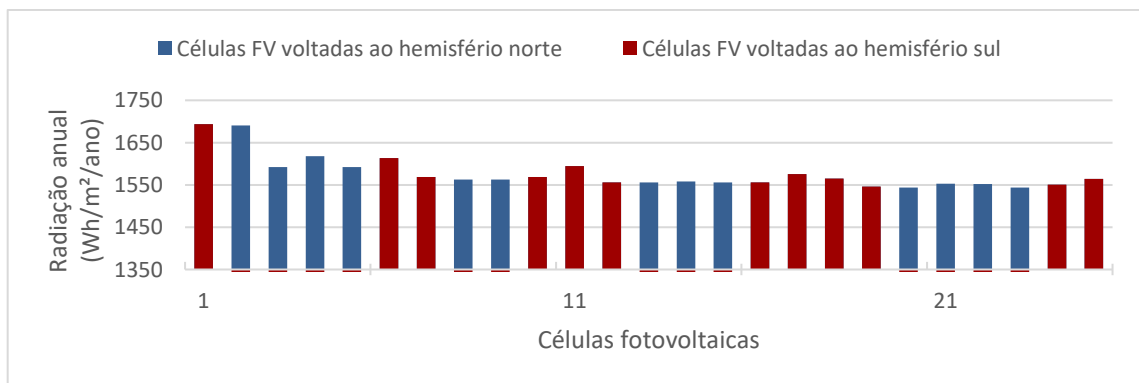
(b)



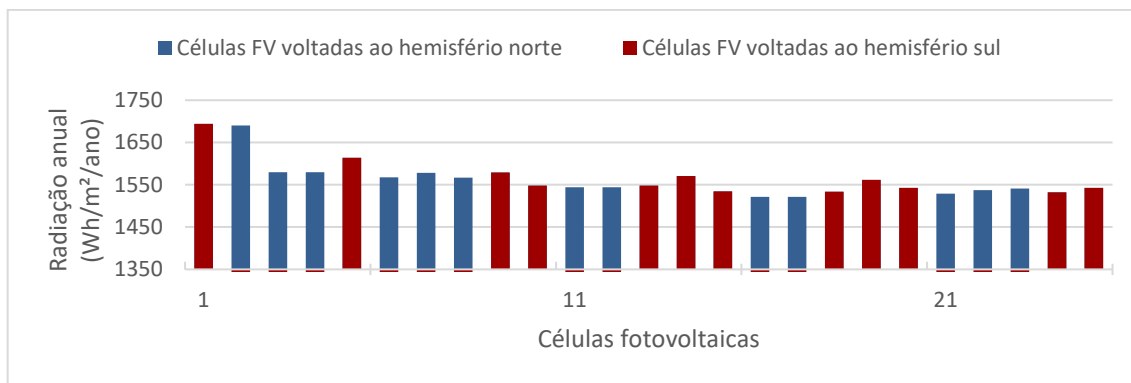
(c)



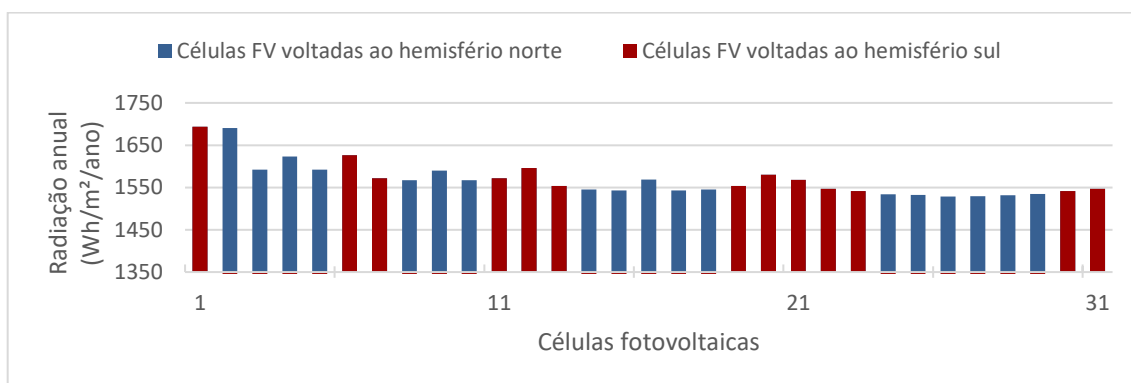
(d)



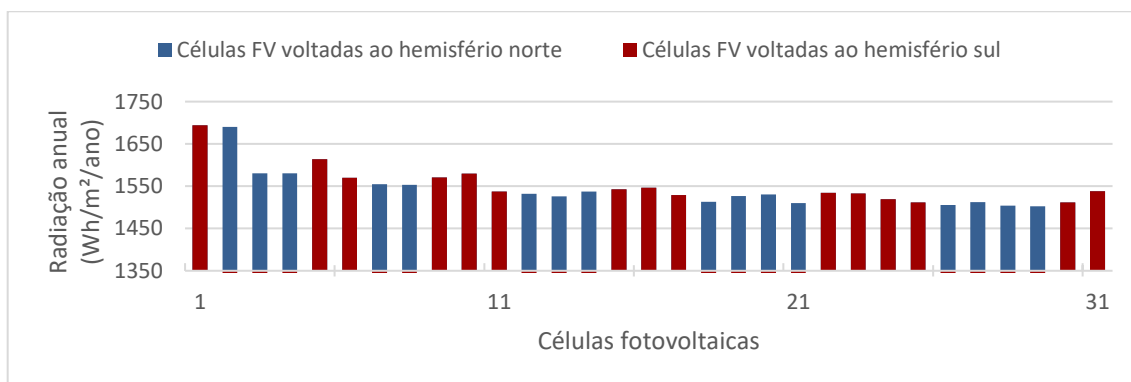
(e)



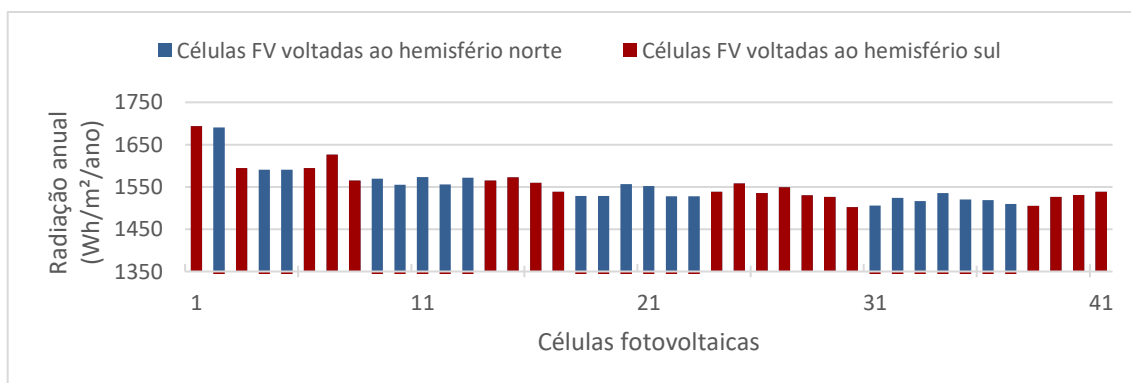
(f)



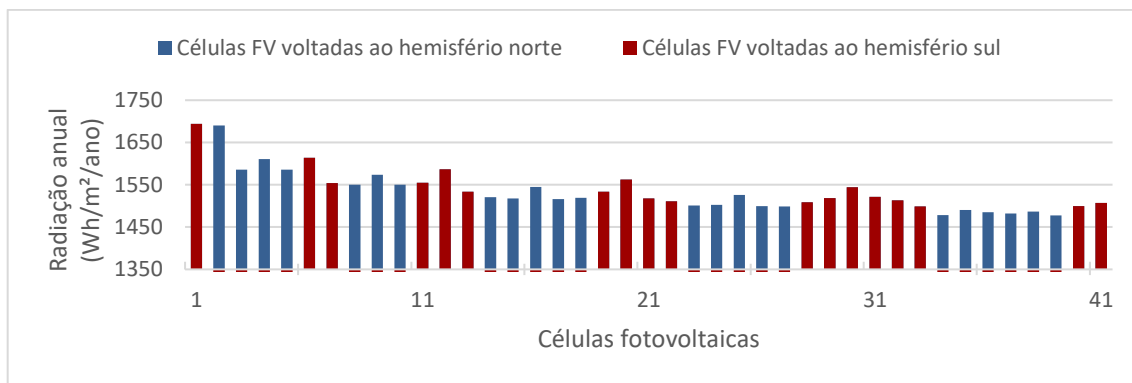
(g)



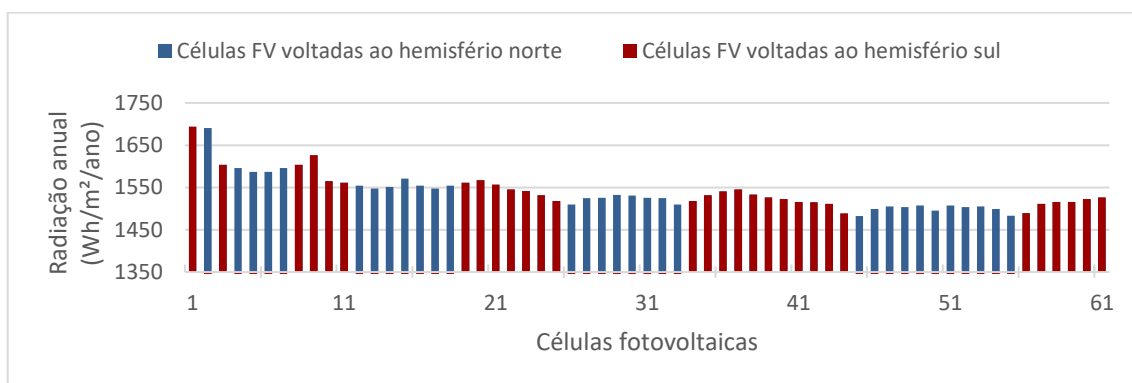
(h)



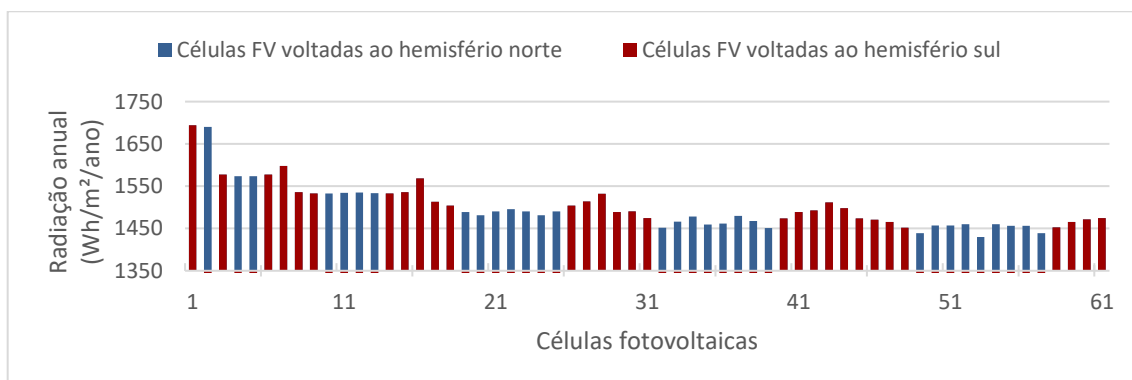
(i)



(j)

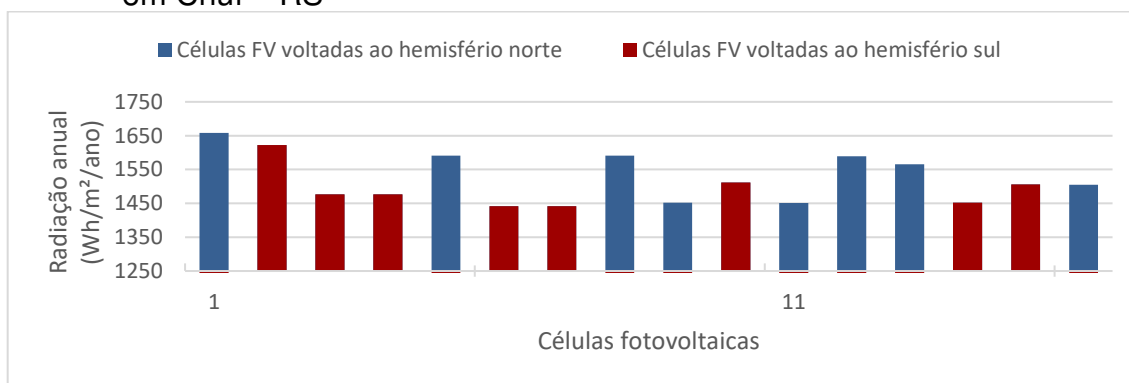


(k)

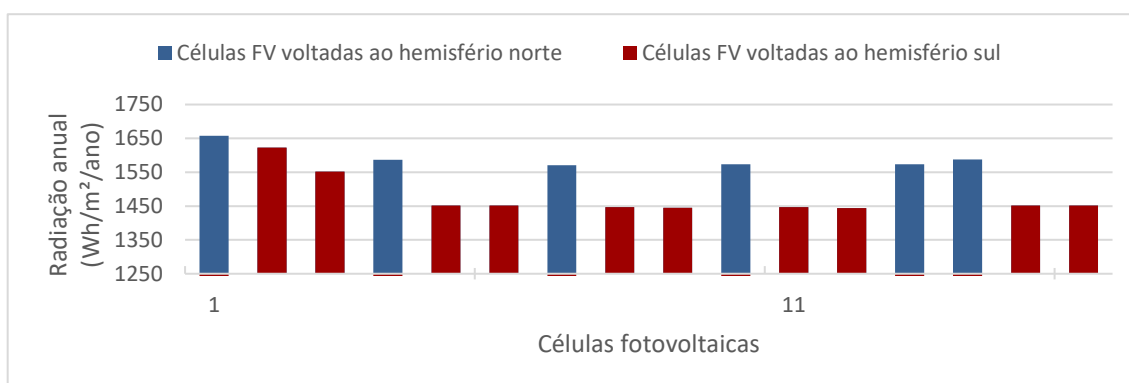


(l)

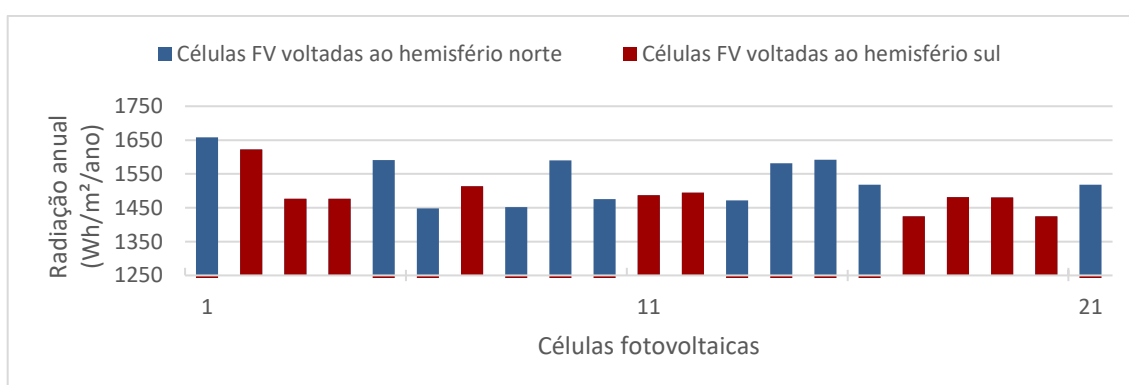
Figura B6 - Radiação solar anual em cada célula FV para as árvores do modelo M2 com (a) 16 células FV, 5 camadas; (b) 16 células FV, 6 camadas; (c) 21 células FV, 5 camadas; (d) 21 células FV, 6 camadas; (e) 25 células FV, 5 camadas; (f) 25 células FV, 6 camadas; (g) 31 células FV, 5 camadas; (h) 31 células FV, 6 camadas; (i) 41 células FV, 5 camadas; (j) 41 células FV, 6 camadas; (k) 61 células FV, 5 camadas; e (l) 61 células FV, 6 camadas, em Chuí – RS



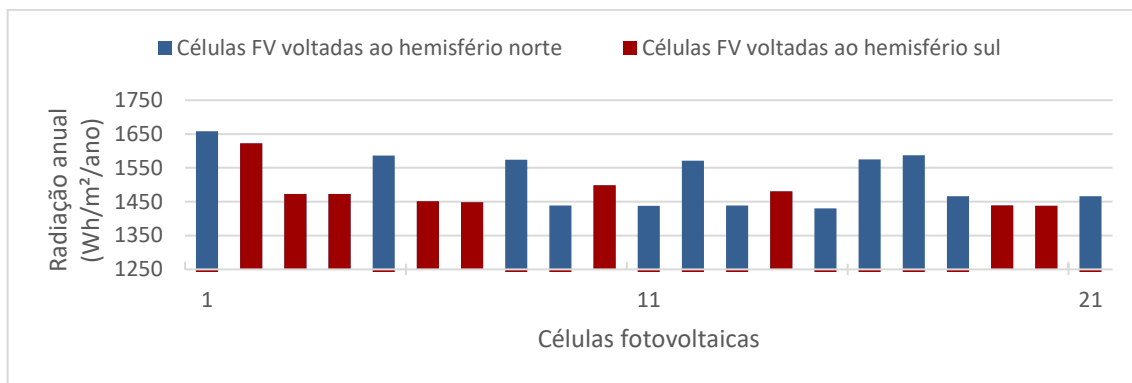
(a)



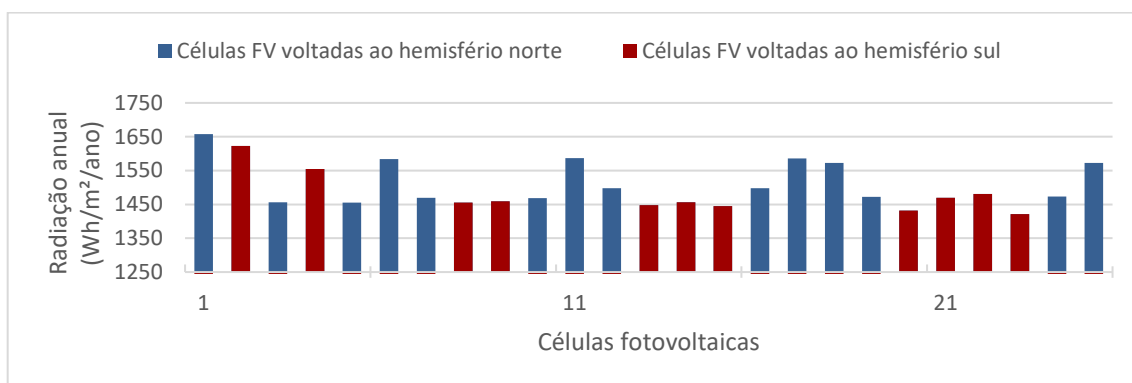
(b)



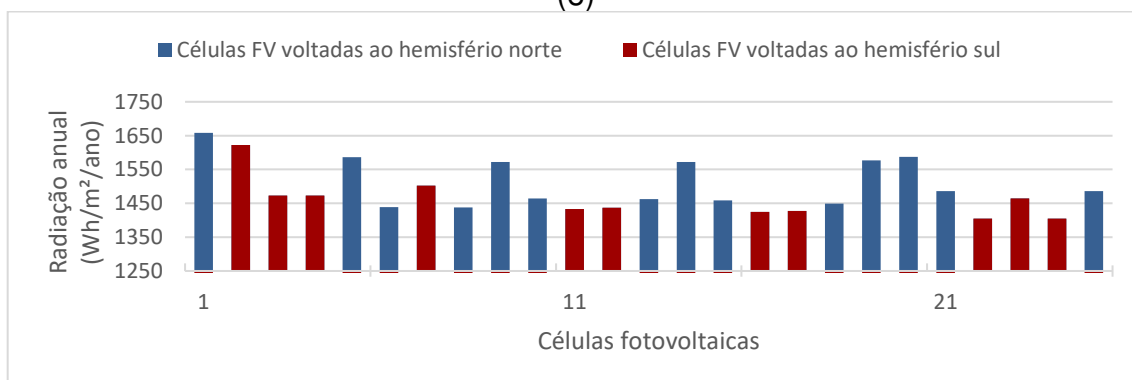
(c)



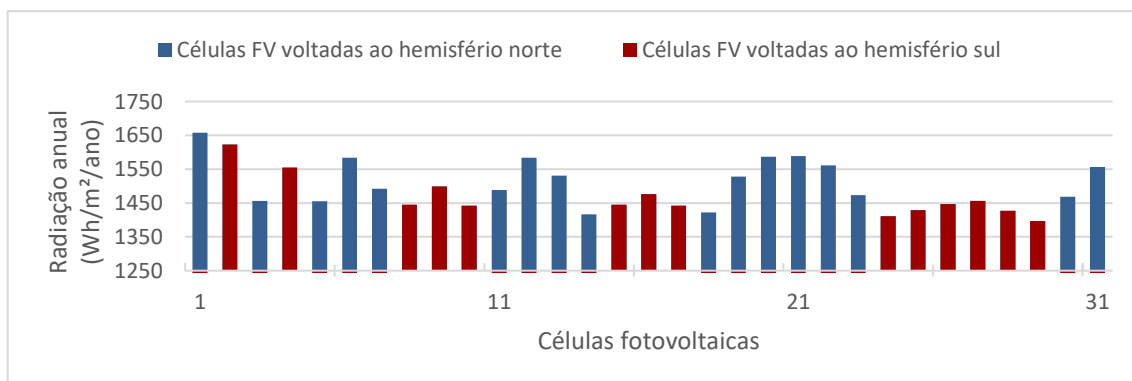
(d)



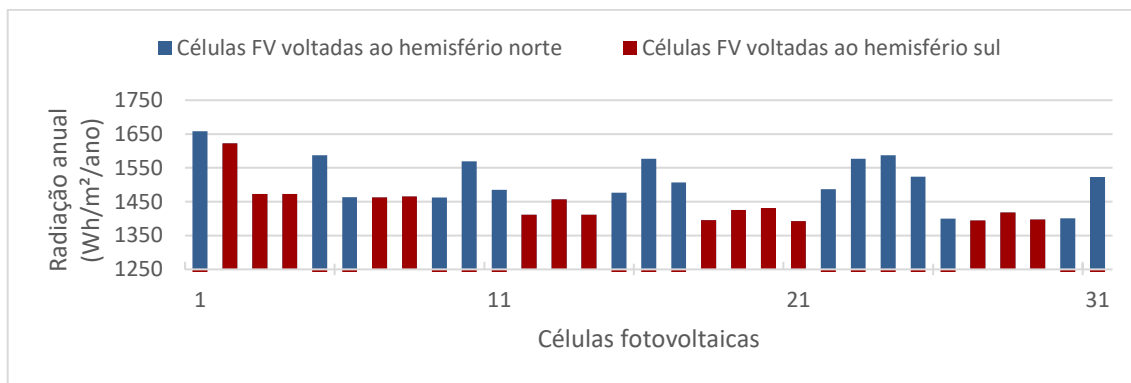
(e)



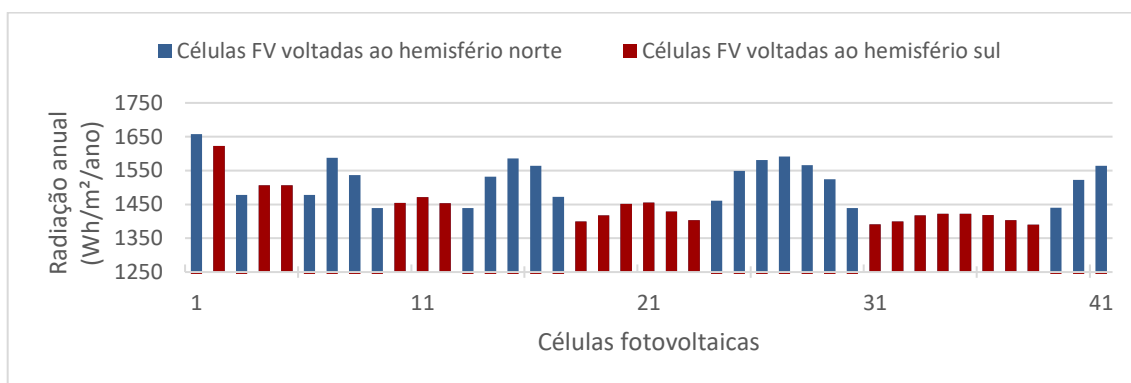
(f)



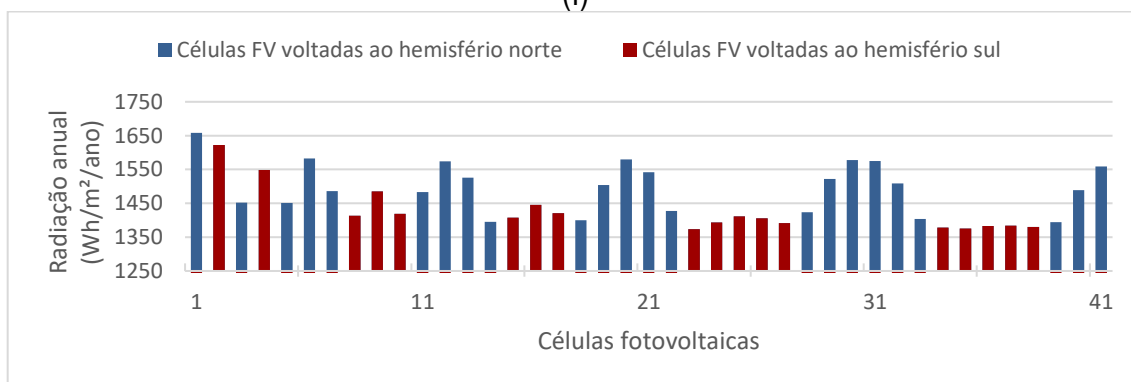
(g)



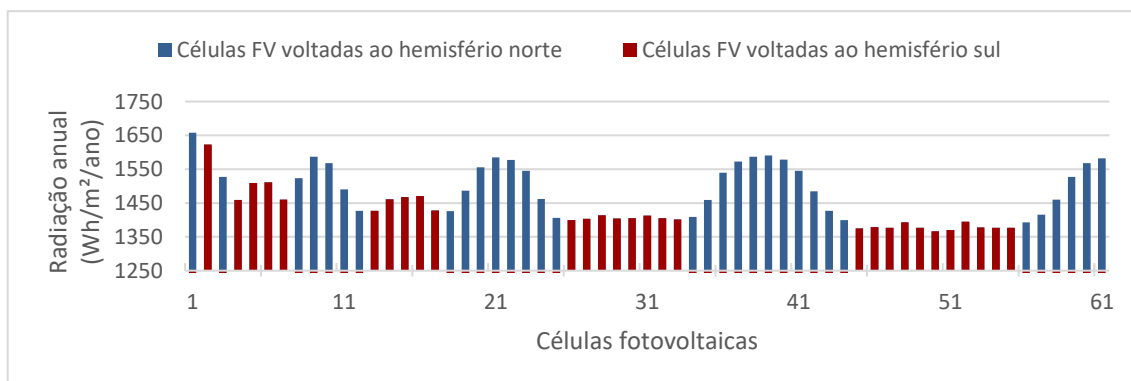
(h)



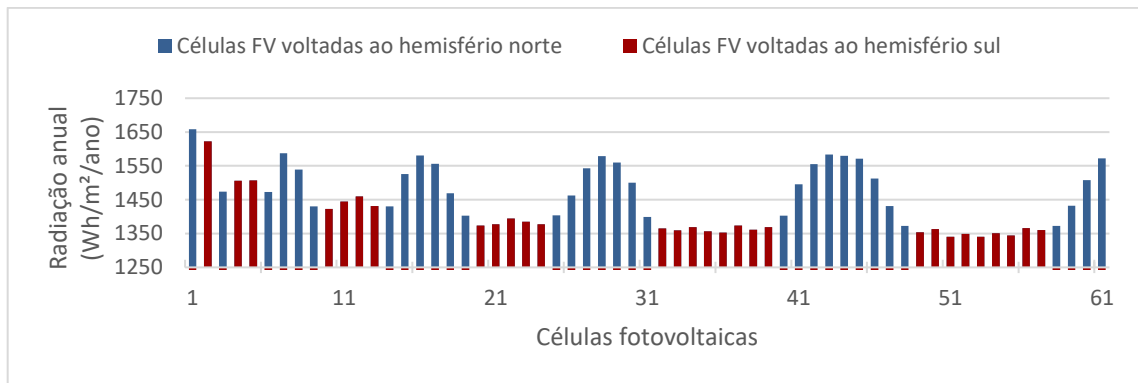
(i)



(j)



(k)



(l)