

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

SISTEMA AGRIVOLTAICO EM HORTAS URBANAS

JOSÉ AUGUSTO CENCI CASTILHO¹, CAIO DE MORAES SANTOS², RAPHAEL REINALDO HECK GIEMBINSKY³,
EDUARDO SHIGEO HOJI⁴

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.00.00.00-9 Engenharias.

RESUMO: O propósito desta pesquisa é analisar a viabilidade de implementação de sistemas agrivoltaicos, que consiste em instalar painéis fotovoltaicos sobre áreas de cultivo, permitindo a produção de alimentos e energia elétrica na mesma área. Serão realizadas análises de sombreamento, produtividade agrícola e geração de energia elétrica em sistemas agrivoltaicos, afim de verificar a possibilidade de promover ambas as atividades, subindo assim o aproveitamento da terra, a sustentabilidade agrícola e energética, otimizando o uso dos recursos naturais e contribuindo para a redução da emissão de gases de efeito estufa. Para isso, será realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, e uma análise de estudos de caso, buscando identificar as melhores práticas e os desafios para a implementação de sistemas agrivoltaicos.

PALAVRAS-CHAVE: agrivoltaico; energia solar; agricultura; sustentabilidade.

AGROVOLTAIC SYSTEM IN URBAN GARDENS

ABSTRACT: The purpose of this research is to analyze the feasibility of implementing agrivoltaic systems, which involves installing photovoltaic panels on agricultural areas, allowing the production of food and electricity in the same area. Analyses of shading, agricultural productivity and electricity generation in agrivoltaic systems will be conducted to assess the potential for promoting both activities, increasing land utilization, agricultural and energy sustainability, optimizing the use of natural resources and contributing to the reduction of greenhouse gas emissions. To achieve this, a literature review on the topic will be conducted, along with a case study analysis, aiming to identify best practices and challenges for the implementation of agrivoltaic systems.

KEYWORDS: agrivoltaics; solar energy; agriculture; sustainability.

INTRODUÇÃO

Atualmente, com o avanço da população mundial, a demanda por energia elétrica e alimento tem crescido significativamente, colocando pressão sobre os recursos naturais. A produção de alimentos e geração de energia elétrica geralmente competem por áreas de terra, o que dificulta mais ainda a

sustentabilidade e produtividade. Os sistemas agrivoltaicos surgem como uma solução muito adequada pra esse problema, já que é uma técnica que consiste em instalar painéis fotovoltaicos sobre áreas de cultivo, permitindo a produção de alimentos e energia elétrica na mesma área, otimizando assim o uso dos recursos disponíveis.(DUPRAZ et al., 2011; AMADUCCI; YIN; COLAUZZI, 2018; GORJIAN et al., 2022).

Além da produção dual, a utilização de sistemas agrivoltaicos pode trazer benefícios para a agricultura, como a redução da evaporação da água, aumento da eficiência no uso da água, redução da erosão do solo, em razão da sua semelhança com um sistema agrofloresta. (ABIDIN; MAHYUDDIN; ZAINURI, 2021). Ademais, a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como a solar, contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa. (DUPRAZ et al., 2011). Este trabalho busca avaliar a viabilidade técnica da utilização de sistemas agrivoltaicos em hortas urbanas que, em geral, possuem área pequena. (AMADUCCI; YIN; COLAUZZI, 2018).

Foram realizadas análises de sombreamento, produtividade agrícola e geração de energia elétrica em sistemas agrivoltaicos, afim de verificar a possibilidade de promover ambas as atividades, aprimorando o aproveitamento da terra, a sustentabilidade agrícola e energética, otimizando o uso dos recursos naturais e contribuindo para a redução da emissão de gases de efeito estufa. (LEE et al., 2023).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a pesquisa, o primeiro passo foi a definição da estrutura do sistema agrivoltaico e do convencional, como nas Figuras 1 e 2. Como pode-se observar, no sistema agrivoltaico, os módulos fotovoltaicos são instalados em uma estrutura elevada, de 2.3m de altura, com espaçamento de 66cm entre os módulos. Já no sistema convencional, os módulos fotovoltaicos são instalados em uma estrutura mais baixa, de apenas 40cm de altura (na parte mais baixa do módulo), sem espaçamento entre os módulos.

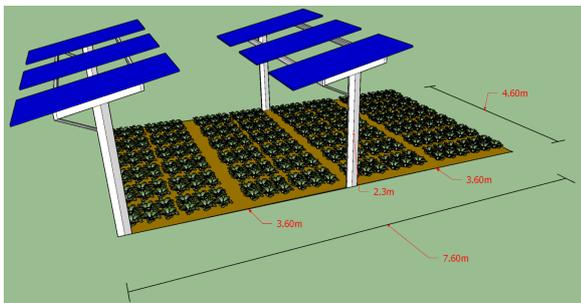


Figura 1: Autoria própria - Sistema Agrivoltaico

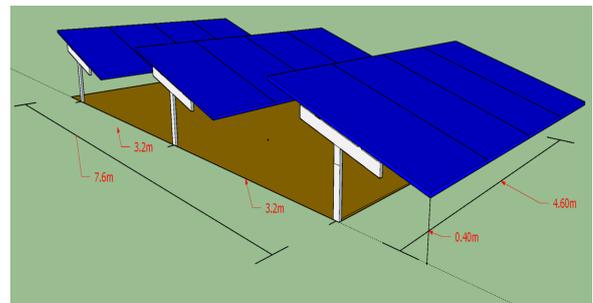


Figura 2: Autoria própria - Sistema Convencional

$$ls|t = \frac{e + h \cdot \sin(\beta) \cdot \cos(f_i)}{\sin(\beta) \cdot \sin(90^\circ - \beta + f_i)} \quad (1)$$

$$ls|b = \frac{e \cdot \cos(f_i)}{\sin(\beta) \cdot \sin(90^\circ - \beta + f_i)} \quad (2)$$

$$\text{sombra} = ls|t - ls|b \quad (3)$$

em que,

- e - altura do objeto (m),

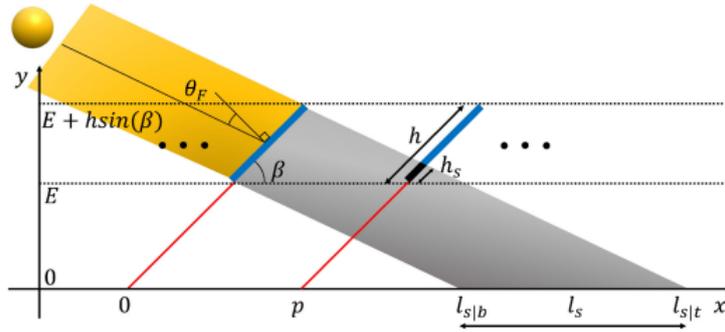


Figura 3: Imagem para explicar o cálculo da sombra projetada, retirada do artigo de (RIAZ et al., 2021).

- h - altura do painel fotovoltaico (m),
- β - ângulo do painel fotovoltaico (graus $^\circ$),
- f_i - ângulo solar em graus, convertido para radianos como f_{rad} .

Há diversas maneiras de posicionar os módulos fotovoltaicos de modo com que fiquem menos ou mais inclinados. Para mensurar isso, tem-se a variável β , que é o ângulo de inclinação do painel fotovoltaico com relação à horizontal Figura 3. A sombra projetada, que pode ser calculada pela Equação 3, varia de acordo com os parâmetros que compõe as Equações 1 e 2 como a altura do painel, a altura da estrutura, o ângulo de inclinação do painel fotovoltaico (β°) e o ângulo de incidência solar em graus (ϕ°), convertido para radianos como f_{rad} .

Para obtenção dos ângulos de incidência solar, foi utilizada a ferramenta PV Education (PVEDUCATION, 2023), especificando a latitude e longitude desejadas. Para latitude [21°S] e longitude [50°W], local onde será instalado o sistema agrivoltaico deste estudo, a ferramenta fornece os dados apresentados na Tabela 1. É válido ressaltar que a ferramenta utiliza como referência o hemisfério Norte, logo, os valores de (ϕ°) devem ser multiplicados por (-1) para o hemisfério Sul.

Tabela 1: Inclinação do ângulo de incidência solar ao longo do ano.

Mês	Dia 01 (ϕ°)	Dia 15 (ϕ°)	Dia 28 (ϕ°)
Jan	23.01	21.27	18.04
Fev	17.52	13.29	8.67
Mar	8.29	2.82	-3.62
Abr	-4.02	-9.41	-14.59
Mai	-14.90	-18.79	-21.90
Jun	-22.04	-23.31	-23.18
Jul	-23.12	-21.52	-18.17
Ago	-17.91	-13.78	-8.10
Set	-7.72	-2.22	3.82
Out	4.22	9.60	15.06
Nov	15.36	19.15	21.97
Dez	22.11	23.34	23.09

Dados coletados com o auxílio de: (PVEDUCATION, 2023)

A partir dessas informações, é possível estimar a sombra projetada pelos módulos e definir a distância adequada entre as fileiras de módulos, de modo que uma fileira não projete sombra por cima

da outra, tanto no sistema agrivoltaico, quanto no convencional. Para isso, foi desenvolvido um script em python, que calcula a sombra projetada em função dos parâmetros estabelecidos. Os resultados são apresentados nas Figuras 4 e 5.

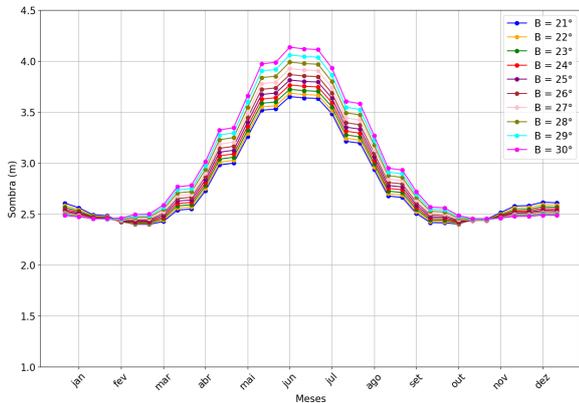


Figura 4: Gráfico da projeção da sombra em função dos ângulos de inclinação dos painéis solares, para o sistema agrivoltaico.

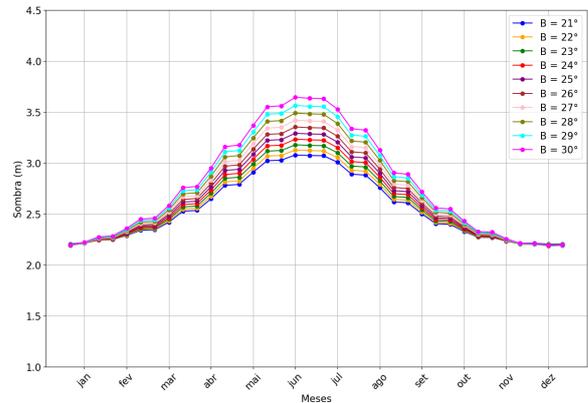


Figura 5: Gráfico da projeção da sombra em função dos ângulos de inclinação dos painéis solares, para o sistema convencional.

Para o sistema convencional, representado pela Figura 5, para o $\beta = 21^\circ$, a sombra projetada é de aproximadamente 3,2m. Já para o sistema agrivoltaico, representado pela Figura 4, para o $\beta = 21^\circ$, a sombra projetada é de aproximadamente 3,6m.

Estação: Moncoes
Município: Moncoes , SP - BRASIL
Latitude: 20,901° S
Longitude: 50,049° O
Distância do ponto de ref. (21° S; 50° O) : 12,1 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,83	5,91	5,29	4,93	4,10	3,83	4,08	4,97	5,00	5,63	6,00	6,20	5,16	2,38
✓	Ângulo igual a latitude	21° N	5,29	5,64	5,41	5,53	4,99	4,87	5,10	5,82	5,29	5,49	5,51	5,54	5,37	,95
✓	Maior média anual	20° N	5,33	5,66	5,42	5,52	4,96	4,83	5,07	5,79	5,29	5,51	5,54	5,58	5,37	,96
✓	Maior mínimo mensal	27° N	5,06	5,46	5,35	5,60	5,15	5,07	5,30	5,95	5,28	5,38	5,28	5,27	5,34	,89

Figura 6: Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia], ferramenta da (CEPEL, 2023).

A Figura 6 mostra a irradiação solar média mensal para a latitude de 21°S e longitude de 50°W, que é de aproximadamente 5,37[kWh/m².dia]. O dado obtido será utilizado para estimar/calcular a produção de energia elétrica nos sistemas agrivoltaico e convencional.

O *Land Equivalent Ratio (LER)* é um indicador de eficiência energética que compara a produção de biomassa e energia elétrica entre os sistemas agrivoltaico e convencional. (RIAZ et al., 2021).

Para o cálculo do *LER*, é necessário considerar que tenha-se uma área de referência, que, neste trabalho, a mesma para os dois sistemas, que é de 34,96m².

Por fim, para que se possa calcular o *LER*, que é o indicador de eficiência energética, que será calculado pela Equação 4.

- $FM_{Agrivoltaico}$: biomassa fresca no método agrivoltaico. [toneladas ou kilogramas].
- $FM_{Convencional}$: biomassa fresca no método convencional. [toneladas ou kilogramas].
- $E_{Agrivoltaico}$: produção de eletricidade no método agrivoltaico. [kWh. dia].
- $E_{Convencional}$: produção de eletricidade no método convencional. [kWh. dia].

Cálculo do LER:

$$LER = \frac{FM_{Agrivoltaico}}{FM_{Convencional}} + \frac{E_{Agrivoltaico}}{E_{Convencional}} \quad (4)$$

- Pannel fotovoltaico de 2,20m x 1,10m = 2,42m²;
- Latitude de 21°S e longitude de 50°W (IFSP - Birigui);
- Irradiação solar média mensal de 5,37[kWh/m².dia] para a latitude de 21°S e longitude de 50°W, como na Figura 6.
- Área Ocupada = 7,6m * 4,6m = 34,96m².

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No sistema agrivoltaico, serão instaladas 2 fileiras de módulos, com espaçamento de 66cm entre os módulos e altura de 2,2m, com espaçamento entre fileiras de 3,6m, como calculado na Figura 4. Assim, ocupando uma área de 4,6m x 7,6m = 34,96m², além de aproveitar a área embaixo para plantio de hortaliças, como na Figura 1.

A produção de energia elétrica:

$$E_{Agrivoltaico} = 6 * 2,42m^2 * 5,37kWh/m^2 = 77,97 \text{ kWh/dia.}$$

Já no sistema fotovoltaico convencional serão instaladas 3 fileiras de módulos, sem espaçamento entre os módulos e altura de 0,4m, com espaçamento entre fileiras de 3,2m, como calculado na Figura 5. Assim, ocupando uma área de Área = 7,6m * 4,6m = 34,96m², sem aproveitar a área embaixo para plantio de hortaliças, já que o sombreamento é praticamente absoluto, como na Figura 2. Sempre utilizando a mesma área.

A produção de energia elétrica:

$$E_{Convencional} = 12 * 2,42m^2 * 5,37kWh/m^2 = 155,94 \text{ kWh/dia.}$$

Mesmo produzindo menos energia elétrica, os cálculos realizados indicam que a terra é melhor aproveitada em um sistema agrivoltaico do que em um gerador convencional. Porém, a mensuração dessa diferença apenas será possível após a colheita. Atualmente, está sendo iniciada a instalação dos módulos no sistema agrivoltaico e o cultivo do plantio. Os resultados completos da análise serão publicados futuramente.

CONCLUSÕES

Como pode-se observar, quanto mais próximo da latitude o β estiver, menor será a sombra projetada, e por conseguinte, as fileiras de módulos podem ficar mais próximas, assim aproveitando mais a terra. Portanto, a escolha do ângulo de inclinação do pannel fotovoltaico é um fator importante para a produção de energia em sistemas de geração fotovoltaica. As informações obtidas com o script em Python, foram essenciais para a definição da estrutura dos sistemas agrivoltaico e convencional. Por fim, a análise teórica do *LER* mostra que mesmo com metade da produção de energia elétrica, o sistema agrivoltaico é mais eficiente que o sistema convencional, podendo aumentar a produtividade geral da terra. No entanto, é importante ressaltar que a análise completa do sistema será realizada após a colheita e publicada futuramente.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Na metodologia, J.A.C.C. desenvolveu o script em Python para calcular a sombra projetada e determinou o número de fileiras de módulos fotovoltaicos para os sistemas agrivoltaico e convencional. Ele também modelou as estruturas e analisou o sombreamento, produtividade agrícola e geração de energia dos sistemas. Na seção de resultados e discussão, J.A.C.C. analisou os dados e comparou os sistemas agrivoltaico e convencional. Todos os autores têm trabalhado na instalação do sistema agrivoltaico e revisaram e aprovaram a versão final do trabalho.

AGRADECIMENTOS

J.A.C.C. agradece ao IFSP - campus Birigui pelo apoio financeiro por meio de bolsa PIBIFSP. C.M.S. e R.R.H.G. agradecem ao IFSP pelas bolsas de extensão.

REFERÊNCIAS

- ABIDIN, M. A. Z.; MAHYUDDIN, M. N.; ZAINURI, M. A. A. M. Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review. *Sustainability*, v. 13, n. 14, 2021. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/14/7846>>.
- AMADUCCI, S.; YIN, X.; COLAUZZI, M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, v. 220, p. 545–561, 2018. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918304197>>.
- CEPEL. Cresesb - centro de referência para energia solar e eólica sérgio de salvo brito. 2023. Disponível em: <<https://cresesb.cepel.br/index.php/#data>>. Acesso em: 19 de março de 2023.
- DUPRAZ, C. et al. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, v. 36, n. 10, p. 2725–2732, 2011. ISSN 0960-1481. *Renewable Energy: Generation & Application*. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111001194>>.
- GORJIAN, S. et al. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 158, p. 112126, 2022. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122000545>>.
- LEE, S. et al. Agrivoltaic system designing for sustainability and smart farming: Agronomic aspects and design criteria with safety assessment. *Applied Energy*, v. 341, p. 121130, 2023. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923004944>>.
- PVEDUCATION. *Sun Position Calculator*. 2023. Disponível em: <<https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator>>. Acesso em: 19 de março de 2023.
- RIAZ, M. H. et al. Module technology for agrivoltaics: Vertical bifacial versus tilted monofacial farms. *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, v. 11, n. 2, 2021.