

SISTEMAS AGRIVOLTAICOS NA AGRICULTURA FAMILIAR: ESTUDO DE CASO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Laís Cassanta Vidotto – laisvidotto@gmail.com

Laboratório Fotovoltaica UFSC, Universidade Federal da Santa Catarina

Kathlen Schneider

Science Policy Research Unit (SPRU), Business School, Universidade de Sussex

Mateus Pena Temer Martins Ribeiro

Lucas do Nascimento

Ricardo Rütter

Laboratório Fotovoltaica UFSC, Universidade Federal da Santa Catarina

Ramom Weinz Morato

Associação Maniva de Certificação Participativa - Opac Maniva

Resumo. *Os sistemas agrivoltaicos combinam o uso da terra para agricultura e geração de energia fotovoltaica, e têm ganhado destaque internacional. No Brasil a tecnologia pode representar uma alternativa para combater os altos índices de insegurança alimentar e pobreza energética, porém, seu potencial no país ainda é pouco explorado. O presente estudo de caso se concentra em quatro famílias de uma associação de produtores orgânicos do Amazonas. Duas topologias de sistemas agrivoltaicos foram propostas. Foram coletados dados como consumo energético, planos futuros da associação, práticas agrícolas, condições climáticas e dados de irradiação para estimar as potências necessárias para os sistemas fotovoltaicos. A análise econômica levou em consideração potenciais riscos de perda de produtividade agrícola devido à sombra das estruturas agrivoltaicas. Os resultados da análise econômica revelam que, embora o CAPEX inicial possa ser maior do que instalações convencionais, ele não inviabiliza os sistemas. Foram avaliados três cenários de contribuição dos agricultores no investimento inicial: 100, 80 e 60%. Mesmo no caso em que os agricultores entram com 100% do investimento, o payback descontado é de 7 anos e 10 meses. Neste mesmo cenário, o VPL e a TIR resultantes foram de R\$ 98.232,76 e 24,41%, respectivamente. Além disso, foi observada a sinergia entre sistemas agrivoltaicos e modelos de negócios de energia compartilhada, a qual pode aproveitar a figura jurídica de associação já existente para a distribuição de créditos de energia. O projeto individual proposto pode beneficiar diretamente quatro famílias ribeirinhas e impactar 84 famílias consumidoras, ao mesmo tempo em que apoia a produção orgânica na região amazônica. Além disso, o estudo pode influenciar aplicações agrivoltaicas em contextos de agricultura familiar. Observa-se também a necessidade de mais pesquisas acerca deste tópico em contexto nacional.*

Palavras-chave: *Sistemas agrivoltaicos, Viabilidade econômica, Agricultura familiar*

1. INTRODUÇÃO

Um sistema agrivoltaico pode ser definido como uma tecnologia que visa utilizar simultaneamente a terra para fins agrícolas e geração de energia fotovoltaica (Goetzberger e Zastrow, 1982; Hermann e Schönberger, 2022). A utilização destes sistemas tem emergido como uma alternativa importante para atender às necessidades de energia e, ao mesmo tempo, otimizar o uso da terra (Hermann e Schönberger, 2022). Em países europeus, na Ásia e Estados Unidos, os sistemas agrivoltaicos têm se espalhado rapidamente (Hermann e Schönberger, 2022). Estes sistemas existem em várias escalas, desde pequenas instalações para a agricultura familiar até instalações de grande escala superiores a 700 MW na China, por exemplo. Os sistemas agrivoltaicos tem mostrado o potencial de oferecer uma série de benefícios aos agricultores de todo o mundo. Estes benefícios incluem a redução de necessidade de irrigação e de erosão eólica, proteção contra geadas e granizo e o aumento da eficiência da geração de energia, por resfriamento convectivo dos módulos fotovoltaicos e aumento de eficiência dos módulos fotovoltaicos bifaciais, quando utilizados (Macknick *et al.*, 2022).

O Brasil é um país que conta com recursos excepcionais de irradiação e com um crescimento intenso da tecnologia fotovoltaica na última década (ABSOLAR, 2023; INPE, 2017). Neste contexto, os sistemas agrivoltaicos possuem um grande potencial de gerar impactos positivos, uma vez que o país também enfrenta desafios de insegurança alimentar e de pobreza energética, afetando particularmente as suas populações rurais e marginalizadas (Bezerra *et al.*, 2022; IBGE, 2019; Penssan, 2022). Assim, este estudo de caso tem como objetivo avaliar a viabilidade da aplicação da tecnologia em um contexto de agricultura familiar brasileira. Para atingir este objetivo, foi definido como objeto de estudo o caso específico da Associação dos Produtores de Orgânicos de Iranduba (APOI), situada no estado do Amazonas.

Fundada em 2017, a APOI se dedica a fomentar a agricultura familiar de pequena escala e é composta por 12 famílias associadas, das quais quatro são produtoras de orgânicos. Estas quatro famílias vendem seus produtos através de cestas

de orgânicos, como o modelo de negócio “Comunidade que Sustenta a Agricultura”¹ (CSA), e participam de feiras de orgânicos e editais de compras públicas de alimentos. Ao total, 84 famílias de consumidores são beneficiadas com as cestas de orgânicos. Além do consumo regular de energia doméstica dos associados da APOI, a associação planeja construir uma cozinha industrial, com o apoio do Fundo Amazônia². A cozinha industrial aumentará os gastos energéticos da associação. Neste contexto, o sistema agrivoltaico proposto visa contribuir para a redução de custos com eletricidade e irrigação para algumas das famílias associadas à APOI. Além disso o estudo pode servir de inspiração para outros projetos agrivoltaicos no contexto da agricultura familiar brasileira.

2. METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e econômica de um projeto agrivoltaico que atenda às necessidades específicas de agricultores familiares, foi desenvolvido o projeto dos sistemas e realizada uma avaliação de viabilidade econômica. Neste contexto, o projeto dos sistemas foi proposto considerando as realidades econômicas desses agricultores, bem como sua disponibilidade de materiais e recursos. Para definir o projeto dos sistemas agrivoltaicos, foram seguidos alguns passos:

1. Foram coletadas informações sobre os planos futuros da associação, o número de associados e o funcionamento do modelo de negócio da associação;
2. A localização das fazendas, atividades agrícolas e a infraestrutura existente foram mapeadas e analisadas;
3. Os dados de irradiação foram obtidos do Atlas Solarimétrico (INPE, 2017);
4. O tamanho necessário dos sistemas fotovoltaicos foi estimado;
5. Foram definidos os componentes do sistema fotovoltaico e principais aspectos do projeto;
6. Simulações no PVSyst® foram realizadas para estimar produção de energia;
7. Simulações no Google Sketchup® foram realizadas para avaliação de impactos de sombreamento nos cultivos agrícolas.

O custo inicial de investimento (CAPEX) dos sistemas agrivoltaicos é normalmente mais alto do que sistemas convencionais (Hermann e Schönberger, 2022), o que pode representar um desafio da implementação da tecnologia agrivoltaica. No contexto da agricultura familiar brasileira, este desafio também é presente, e a avaliação de viabilidade econômica destes sistemas se torna de grande relevância. Para desenvolver a análise econômica foram seguidos alguns passos metodológicos:

1. Definição de um período de projeto de 25 anos para calcular os indicadores econômicos;
2. Levantamento das contas atuais de energia elétrica de quatro famílias produtoras envolvidas no projeto;
3. Estimativa do consumo elétrico futuro da cozinha industrial;
4. Cálculo da capacidade de potência e produção de energia dos sistemas agrivoltaicos piloto propostos visando atender o consumo de energia das quatro famílias + cozinha industrial;
5. Cálculo do CAPEX e OPEX dos sistemas propostos;
6. Comparação de cenários potenciais de perda de produtividade agrícola com a economia de eletricidade associadas ao sistema agrivoltaico;
7. Cálculo de indicadores econômicos: VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno) e período de retorno (*Payback*) descontado de três cenários diferentes de cenários:
 - 100% do investimento por parte dos agricultores;
 - 80% do investimento por parte dos agricultores;
 - 60% do investimento por parte dos agricultores.

2.1 Definição das condições de contorno do estudo

Inicialmente foi feita uma investigação sobre o funcionamento da associação para definir o escopo do projeto. Atualmente são 12 famílias de produtores rurais associados à APOI, das quais quatro produzem orgânicos. Estas quatro famílias utilizam diferentes modelos de negócio para destinar sua produção: cestas de orgânicos, por meio do modelo CSA (Iniciativa CSA Manaus), e outra iniciativa chamada "Cesta Verde"; participação em feiras e participação em editais de compras públicas. O modelo das iniciativas CSA e Cesta Verde consiste em parcerias entre agricultores e consumidores em que as responsabilidades, riscos e recompensas da agricultura são compartilhadas, e os consumidores se comprometem com a aquisição de cestas de orgânicos por um prazo determinado. Ao total estas iniciativas beneficiam 84 famílias consumidoras. Para a realização deste estudo o contexto das quatro famílias de agricultores orgânicos foi considerado como delimitação do estudo. Estas quatro famílias utilizarão uma cozinha industrial colaborativa, que será viabilizada pelo Fundo Amazônia. Além disso, considerou-se que toda a energia gerada pelos sistemas agrivoltaicos seria injetada na rede de distribuição, e que os créditos seriam depois compensados nas faturas das famílias envolvidas.

¹ <https://agroecologiaemrede.org.br/experiencia/csa-manaus/>

² <https://www.fundoamazonia.gov.br/pt/home/>

2.2 Escolha dos designs dos sistemas agrivoltaicos propostos

Foram propostos dois sistemas: um agrivoltaico elevado e uma casa de vegetação agrivoltaica. As casas de vegetação possuem estruturas semelhantes a estufas, mas são abertas nas laterais e têm o objetivo de proteger as lavouras das fortes chuvas, típicas da região amazônica. Estas estruturas são comuns na região e estão presentes no contexto das famílias da associação. A casa de vegetação agrivoltaica proposta conta com módulos convencionais intercalados com estruturas transparentes (de vidro ou plástico) que permitem a passagem de luz e maior homogeneidade de irradiação nas culturas. Como mencionado, foi simulada a sombra que afeta as lavouras, a fim de evitar sombreamento intenso na produção agrícola e encontrar o melhor desenho do sistema.

Para as simulações e projeto, foram utilizados módulos bifaciais da empresa JA Solar de 440W (JAM72-D20-440-MB), os quais apareceram nas classificações PVEL³ e PV-Tech⁴ e são amplamente utilizados no país em escala comercial. Para o posicionamento dos sistemas, levou-se em consideração a posição geográfica dos terrenos dos agricultores e das estruturas já existentes, uma vez que o principal objetivo é minimizar qualquer impacto que o sistema agrivoltaico proposto possa causar na produção agrícola. Buscou-se criar um sistema que pudesse ser replicado e, também, utilizar materiais que já são utilizados pelas famílias, como madeira para a estrutura física e filme plástico na casa de vegetação para as áreas sem módulos.

Adicionalmente, um sistema de captação de água da chuva foi projetado para funcionar em associação a um sistema de irrigação na casa de vegetação. Esta aplicação funcionaria melhor com estruturas de vidro intercaladas com os módulos, no lugar das estruturas de filme plástico que são convencionalmente utilizadas na região do estudo de caso.

2.3 Custos de energia elétrica das famílias e da cozinha industrial

Dados das faturas de eletricidade das quatro famílias de agricultores consideradas neste estudo de caso foram coletados para calcular o consumo médio total da eletricidade por residência. As médias calculadas a partir destes dados estão disponíveis na Tab. 1.

Tabela 1 - Consumo médio de energia elétrica das quatro famílias

Agregado familiar	Consumo médio mensal de energia (kWh/mês)	Consumo total anual (kWh/ano)
Casa 1	475,2	5.702,5
Casa 2	486,3	5.835,0
Casa 3	296,8	3.561,5
Casa 4	270,1	3.241,0
Total	1.528,4	18.340,0

Também foi estimado o consumo de energia elétrica da cozinha industrial, considerando alguns equipamentos associados às atividades e produtos agrícolas produzidos pelas famílias. Esta estimativa está disponível na Tab. 2.

Tabela 2 - Consumo médio estimado de energia elétrica da cozinha industrial

Equipamentos	Qtd	Potência (W)	Horas diárias de uso	Consumo médio (kWh/mês)
Despolpadeira	1	245	3	14,7
Freezers	2	-	-	144,2
Seladora a vácuo	1	700	3	42,0
Liquidificador industrial	1	1000	2	40,0
Forno elétrico	1	5000	6 por semana	120,0
Total				360,90

³ <https://scorecard.pvel.com/top-performers/>

⁴ <https://www.pv-tech.org/top-50-most-bankable-module-suppliers-in-the-pv-industry-today/>

No total, o consumo médio mensal estimado de energia elétrica é de 1.889,2 kWh/mês, o que resulta em um consumo total anual de 22,7 MWh/ano.

O tamanho do sistema foi calculado para fornecer a energia elétrica necessária para as quatro residências e a cozinha industrial, levando em consideração o atual sistema de compensação de créditos de energia, regulado pela Lei 14.300⁵. Consumidores do Grupo B estão sujeitos a pagar o custo de disponibilidade quando esse valor é maior que o faturamento referente à energia consumida da rede. O valor do custo de disponibilidade se refere ao valor em moeda corrente referente a 30 kWh (se monofásica), 50 kWh (se bifásica) e 100 kWh (se trifásica).

As unidades consumidoras envolvidas neste estudo de caso estão todas em conexões monofásicas, e a cozinha industrial será conectada a uma das unidades consumidoras. Desta forma, para os cálculos de dimensionamento dos sistemas propostos considerou-se que 120 kWh de energia elétrica (30 kWh x quatro unidades consumidoras) seriam equivalentes ao custo de disponibilidade, uma “taxa mínima” cobrada mensalmente. Utilizando este valor nos cálculos evita-se o superdimensionamento do sistema. O consumo e as taxas de disponibilidade estão dispostos na Tab. 3.

Tabela 3 – Consumo e as taxas de disponibilidade

Descrição	Valor	Unidade
Consumo médio de energia elétrica (por mês)	1889,2	KWh
Taxa de disponibilidade para as quatro unidades consumidoras (por mês)	120	KWh

É importante ressaltar que este estudo de viabilidade econômica foi desenvolvido para verificar a viabilidade do projeto em uma perspectiva ampla, e a distribuição de créditos de energia elétrica entre as famílias não foi considerada individualmente. Para que o projeto seja implementado, diferentes cenários de investimento proporcional de cada família e o valor de energia elétrica compensada em cada unidade consumidora teriam que ser analisados em maior detalhamento.

2.4 CAPEX dos sistemas propostos

A casa de vegetação agrivoltaica proposta neste estudo de caso foi projetada visando não adicionar grande complexidade às casas de vegetação convencionais já existentes. Assim, a estrutura proposta é de madeira, semelhante às existentes, e a estrutura metálica fotovoltaica e os módulos fotovoltaicos considerados no projeto são os convencionais. Os dados de custo para o sistema fotovoltaico padrão no Brasil foram obtidos do estudo da empresa Greener⁶.

A fim de estimar o CAPEX do sistema elevado proposto, dados do Relatório NREL "Capital costs for dual-use photovoltaic installations"⁷ foram utilizados (Horowitz *et al.*, 2020). De acordo com o estudo, o CAPEX de um sistema agrivoltaico elevado com estruturas reforçadas é cerca de 53% maior do que o de um sistema fotovoltaico convencional em solo. Este dado e os dados da empresa Greener foram utilizados para estimar o custo de investimento inicial para construção do sistema agrivoltaico elevado proposto.

2.5 OPEX dos sistemas propostos

Os custos operacionais considerados no projeto são os relacionados à manutenção dos sistemas fotovoltaicos. O custo de manutenção do sistema fotovoltaico foi considerado 1% a.a. do valor total de investimento inicial do sistema no primeiro ano, mesmo valor adotado em outras pesquisas sobre a viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil (Schneider *et al.*, 2018).

Além disso, como os inversores costumam ter uma vida útil menor quando comparados aos módulos fotovoltaicos, a substituição dos dois inversores dos sistemas propostos foi considerada no ano 10 e no ano 20 da análise econômica. O custo para a substituição do inversor foi obtido considerando dados da NREL de proporção de custos do inversor dentro do custo de um projeto agrivoltaico (Horowitz *et al.*, 2020), e o CAPEX de cada sistema. Além disso, na análise considerou-se uma taxa de inflação de 3,16% a.a.⁸ para estimar custos futuros de manutenção.

⁵ https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm

⁶ <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-2-semester/>

⁷ <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/77811.pdf>

⁸ [https://www.cnnbrasil.com.br/economia/depois-de-8-meses-brasil-tem-inflacao-negativa-de-008-em-junho-diz-ibge/#:~:text=No%20ano%2C%20o%20IPCA%20acumula,Conselho%20Monet%C3%A1rio%20Nacional%20\(CMN\)](https://www.cnnbrasil.com.br/economia/depois-de-8-meses-brasil-tem-inflacao-negativa-de-008-em-junho-diz-ibge/#:~:text=No%20ano%2C%20o%20IPCA%20acumula,Conselho%20Monet%C3%A1rio%20Nacional%20(CMN))

3. RESULTADOS

3.1 Sistemas agrivoltaicos propostos

O sistema de casa de vegetação agrivoltaica proposto é de aproximadamente cinco por onze metros com quinze módulos como visto na Fig. 1. Já, o sistema agrivoltaico elevado ocupa uma área de aproximadamente onze por dez metros com vinte módulos divididos em quatro fileiras de cinco módulos, como mostrado na Fig. 2.



Figura 1 - Casa de vegetação agrivoltaica



Figura 2 - Sistema agrivoltaico elevado

A potência da casa de vegetação e do sistema elevado, assim como o CAPEX resultante para cada um dos sistemas propostos e o CAPEX total para o projeto estão disponíveis na Tab. 4.

Tabela 4 - Capex dos sistemas propostos

	Potência (kWp)	Unidade	CAPEX (R\$)	R\$/kWp	CAPEX Total
Sistema de casa de vegetação	6,60	kWp	R\$ 27.423,00	R\$ 4.155,00	R\$ 79.956,12
Sistema agrivoltaico elevado	8,8	kWp	R\$ 52.533,12	R\$ 5.969,67	

A análise de sombreamento foi realizada para os dias 22 de setembro e 22 de dezembro, datas próximas às estações das temperaturas mais altas e mais baixas na localidade, respectivamente, que também são as datas do equinócio e solstício. Os resultados da análise mostram que durante a estação mais quente, em setembro, a sombra cobre com maior intensidade os cultivos sob os módulos, enquanto que durante dezembro, a sombra permanece majoritariamente na área

entre as culturas, quando as temperaturas são mais baixas e irradiação menos intensa. Recomenda-se que todas as culturas recebam um mínimo de 6h de luz solar direta ao longo do dia, e idealmente em torno de 8h. De forma geral, o sombreamento resultante da implementação dos sistemas não compromete as horas mínimas de sol necessárias para os cultivos. Uma sugestão para o plantio associado aos sistemas agrivoltaicos é que hortaliças folhosas e tomates, que são mais propensos à desidratação, possam ser plantados em áreas com sombra por volta do meio-dia.

3.3 Geração de energia dos sistemas agrivoltaicos propostos

Considerando os sistemas agrivoltaicos propostos, a potência total estimada do projeto é 15,4 kWp. Foi calculada a produção energética estimada dos sistemas agrivoltaicos, resultando numa produção média de eletricidade de 1.770 kWh/mês, ou 21,2 MWh/ano. O consumo médio de energia elétrica de cada um dos domicílios e da cozinha industrial, bem como a produção estimada de energia elétrica estão representados visualmente no Gráfico da Fig. 3 e foram estimados em cerca de 22,7 MWh/ano como anteriormente mostrado.

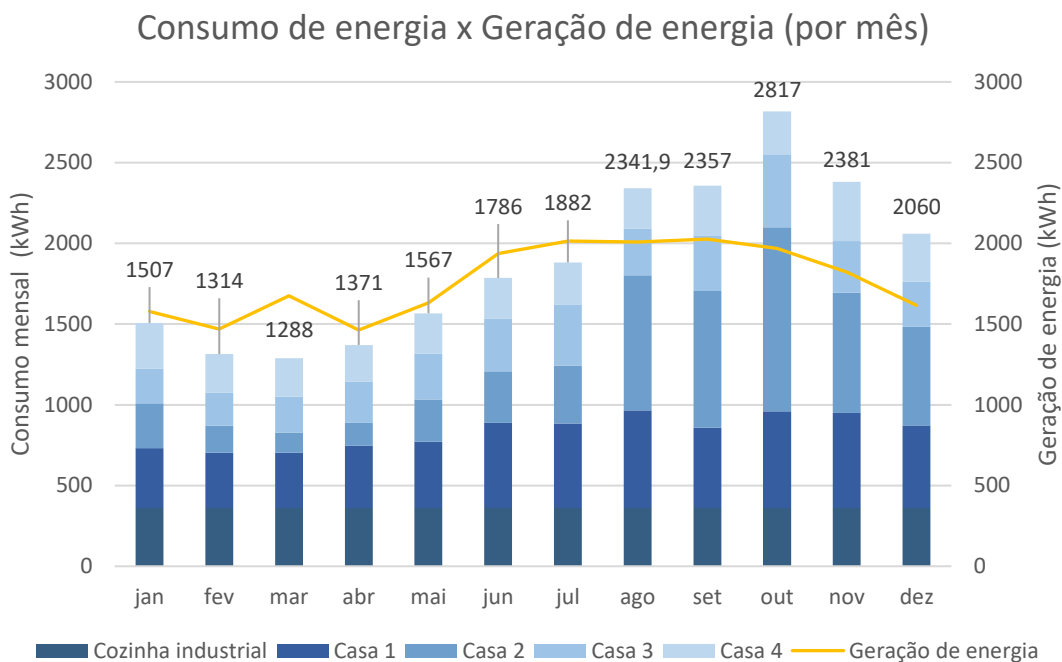


Figura 3 - Gráfico de consumo e geração de energia elétrica por mês

3.2 Cenários potenciais de perda de produtividade agrícola e economia de energia elétrica associada à geração agrivoltaica

Em muitos casos, especialmente em culturas resistentes à sombra, a presença de uma estrutura agrivoltaica pode beneficiar as culturas e aumentar a produtividade agrícola. Um estudo de 2016 relatou que fazendas agrivoltaicas que plantam culturas resistentes à sombra poderiam se beneficiar de um valor econômico 30% maior do que as fazendas convencionais, de acordo com simulações (Dinesh e Pearce, 2016). Embora a produção agrícola possa aumentar, uma possível redução de produtividade também pode ocorrer. Regulamentos na França, Japão e Alemanha estabeleceram os níveis máximos admissíveis de redução de rendimento de cultivos agrícolas em sistemas agrivoltaicos em 10%, 20% e 34%, respectivamente (Bellini, 2022).

Neste estudo, foram considerados quatro cenários de perda de produtividade, a fim de comparar uma estimativa de perda de renda devido à possível perda de produtividade com a economia de energia associada aos sistemas agrivoltaicos propostos, buscando uma análise econômica conservadora. Nesta análise, não foram considerados o CAPEX, apenas os valores operacionais: perda de produtividade, economia de energia e OPEX do sistema fotovoltaico.

Para estimar a perda de produtividade em R\$, considerou-se que a instalação agrivoltaica elevada e as casas de vegetação cobririam aproximadamente 5% da área produtiva dos agricultores. Esta estimativa foi feita com base em imagens aéreas dos terrenos. Ainda, para encontrar a redução equivalente de renda associada à perda de produtividade, considerou-se o número e o preço das cestas de orgânicos. As famílias consideradas no estudo de caso abastecem 84 famílias com cestas mensais de orgânicos, que estão disponíveis em dois tamanhos – pequeno e grande. Considerando

que metade delas seria do tamanho pequeno (R\$ 140) e metade do grande (R\$ 200), a renda mensal total da venda das cestas seria de R\$ 13.940,00 por mês. Os resultados desta análise estão na Tab. 5.

Tabela 5 - Cenários de perda de produtividade agrícola e economia de energia

Perda de produtividade estimada (%)	Perda de produtividade por ano (R\$)	Economia de energia (R\$) no ano 1 considerando os custos de manutenção dos sistemas fotovoltaicos
5%	R\$418,20	R\$15.127,95
10%	R\$836,40	R\$15.127,95
15%	R\$1.254,60	R\$15.127,95
20%	R\$1.672,80	R\$15.127,95

3.4 Indicadores econômicos: VPL, TIR e período de Payback descontado

Nesta análise econômica foram calculados o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de retorno do investimento (*Payback*) descontado para investigar se os sistemas agrivoltaicos propostos no estudo de caso são viáveis.

A utilização da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) nos cálculos foi de 13,25%, que corresponde à Taxa SELIC em agosto de 2023⁹ e representa a taxa mínima de retorno que um investimento deve gerar para ser considerado atrativo ou viável. Nesta análise, considerou-se uma taxa de aumento de 9,2% para a tarifa de energia elétrica, conforme dados do estudo desenvolvido por Montenegro *et al.* (2020).

O VPL, a TIR e o *Payback* descontado foram calculados para três cenários diferentes de subsídios: 100% de investimento dos agricultores, ou seja, sem subsídios; 80% dos agricultores e 60% dos agricultores. Os resultados dos indicadores econômicos estão disponíveis na Tab. 6.

Tabela 6 - VPL, TIR e Payback descontado para os 3 cenários avaliados

Investimento dos agricultores	VPL	TIR	Payback descontado
100%	R\$ 98.232,76	24,41%	7 anos e 10 meses
80%	R\$ 114.223,99	29,01%	5 anos e 10 meses
60%	R\$ 130.215,21	36,59%	4 anos e 1 mês

Todos os cenários analisados neste estudo apresentam resultados econômicos atrativos, com VPLs positivos, TIRs superiores à TMA e períodos de *Payback* descontados menores do que o período de 25 anos do projeto.

4. CONCLUSÕES

O projeto agrivoltaico proposto neste estudo de caso apoiaria diretamente quatro famílias ribeirinhas e impactaria 84 famílias consumidoras da Amazônia, além de incentivar a produção orgânica na região amazônica. Além disso, o projeto apoiaria financeiramente a operação da cozinha industrial, o que valorizará e agregará valor à produção destas famílias.

Neste estudo, o foco principal foi avaliar a viabilidade da implementação de sistemas agrivoltaicos de pequena escala adaptados às necessidades específicas dos pequenos agricultores. Embora seja evidente que o custo inicial desses sistemas pode ser superior ao das instalações fotovoltaicas convencionais, o projeto dos sistemas foi proposto de forma a se adaptar à realidade desses agricultores, bem como com sua disponibilidade de recursos. Nesse contexto, estruturas de madeira foram inseridas no projeto nos sistemas e são sugeridas para a sua implementação, representando uma solução econômica e acessível localmente.

No total, as duas topologias propostas no estudo resultam em 15,4 kWp e possuem potencial de gerar 21,2 MWh de energia elétrica anualmente. Uma das principais conclusões deste estudo é que embora o CAPEX para sistemas agrivoltaicos seja superior ao dos sistemas fotovoltaicos convencionais, o custo permanece dentro de uma faixa razoável, sem impactar de forma considerável os indicadores de viabilidade econômica para casos de sistemas de pequeno porte e simplificados. Isso sugere que esta possível barreira financeira da adoção da tecnologia pode não ser tão significativa para os pequenos agricultores como se poderia imaginar, especialmente quando considerados os benefícios de longo prazo.

⁹ <https://blog.nubank.com.br/taxa-selic/>

Na análise econômica, com o intuito de buscar uma avaliação mais conservadora, foram considerados cenários de redução de produtividade e, mesmo no cenário em que se considerou uma redução de 20% na produção agrícola pela menor incidência de radiação solar sobre a área cultivada, os impactos seriam consideravelmente inferiores aos ganhos auferidos pela economia de energia associada à implantação do projeto. Os indicadores econômicos, como o período de *Payback* descontado de 7 anos e 10 meses para o cenário de investimento 100% dos agricultores, resultaram em números não tão distantes dos dos sistemas fotovoltaicos convencionais (3 a 5 anos em média (Greener, 2023), reforçando que os sistemas agrivoltaicos podem ser uma opção economicamente viável para os pequenos agricultores que buscam integrar a geração de energia renovável com as atividades agrícolas.

Uma oportunidade identificada no estudo está relacionada à sinergia entre os sistemas agrivoltaicos e modelos de negócio de energia compartilhada, uma vez que é possível aproveitar as estruturas de associação já existentes para o compartilhamento de créditos de energia. No Brasil, esse modelo refere-se à prática de múltiplos consumidores gerarem coletivamente energia renovável, muitas vezes por meio de sistemas de energia solar, como no caso proposto. Em um caso de expansão da geração de energia solar na associação, o excedente de energia pode ser distribuído para custos elétricos de outras das 12 famílias associadas à APOI.

Um tópico relevante para futuras investigações é a quantificação do impacto dos sistemas agrivoltaicos na produtividade agrícola. Estudos futuros devem procurar determinar se esses sistemas contribuem positivamente para a produtividade das culturas ou se há alguma redução (ou até ganho em locais com elevados índices de irradiação anual) de produtividade relacionada em associação com culturas específicas. Isso forneceria informações importantes sobre as implicações dos sistemas agrivoltaicos no ecossistema de agricultura familiar e na sustentabilidade da tecnologia associada às práticas agrícolas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio de Kristina Kramer, Stéphanie Gomes e Gustavo Jimenez Enriquez. Este trabalho foi apoiado pelo projeto Parceria Energética Brasil-Alemanha liderado pelo Ministério Federal de Economia e Ação Climática (BMWK), pelo Ministério Federal de Minas e Energia (MME) e pelo Ministério das Relações Exteriores (Itamaraty). A Parceria Energética Brasil-Alemanha é uma plataforma de apoio ao diálogo intergovernamental de alto nível sobre questões energéticas e é implementada no Brasil pela GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit).

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. (2023). Panorama of solar photovoltaic in Brazil and in the world. <https://www.absolar.org.br/en/market/infographic/>
- Bellini, E. (2022). Agrivoltaics for soybeans. *PV Magazine*. <https://www.pv-magazine.com/2022/12/14/agrivoltaics-for-soybeans/>
- Bezerra, P., Cruz, T., Mazzone, A., Lucena, A. F. P., De Cian, E. Schaeffer, R. (2022). The multidimensionality of energy poverty in Brazil: A historical analysis. *Energy Policy*, 171(October). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113268>
- de Albuquerque Montenegro, A., Antonioli, A. F., Rüther, R. (2020). Photovoltaic distributed generation in Brazil: Investment valuation for the 27 capital cities. *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019*, 1448–1456. <https://doi.org/10.18086/swc.2019.25.02>
- Dinesh, H., Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 54, pp. 299–308). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- Goetzberger, A., Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation.
- Greener. (2023). Estudo Estratégico: Geração Distribuída 2023 | Dados do 1º semestre 2023 / Setembro 2023. <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-setembro-2023-dados-do-1o-semester-2023/>
- Hermann, C., Schönberger, F. (2022). Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition. April.
- Horowitz, K., Ramasamy, V., Macknick, J., Margolis, R. (2020). Capital Costs for Dual-Use Photovoltaic Installations: 2020 Benchmark for Ground-Mounted PV Systems with Pollinator-Friendly Vegetation, Grazing, and Crops. www.nrel.gov/publications.
- IBGE. (2019). Características gerais dos domicílios e dos moradores 2019 - PNAD Contínua. Pesquisa Nacional Por Amostra de Domicílios Contínua, 8. https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101707_informativo.pdf
- INPE. (2017). Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição. http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html
- Macknick, J., Hartmann, H., Barron-gafford, G., Beatty, B., Burton, R., Choi, C. S., Davis, M., Davis, R., Figueroa, J., Garrett, A., Hain, L., Herbert, S., Janski, J., Kinzer, A., Knapp, A., Lehan, M., Losey, J., Marley, J., Macdonald, J.,

- ... Walston, L. (2022). The 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors in the United States: Lessons From the InSPIRE Research Study. August, 80. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83566.pdf>
- Penssan. (2022). Insegurança alimentar e covid-19 no Brasil. <https://olheparaafome.com.br/wp-content/uploads/2022/06/Relatorio-II-VIGISAN-2022.pdf>
- Schneider, K., Sorgato, M. J., Rütther, R. (2018). VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS (FV) DE TELURETO DE CÁDMIO (CdTe) EM. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de Abril de 2018. https://fotovoltaica.ufsc.br/artigos_em_anais/CBENS_Kathlen_Marcio_Ricardo.pdf

AGRIVOLTAICS IN FAMILY FARMING: CASE STUDY AND ECONOMIC VIABILITY ANALYSIS

Abstract. Agrivoltaic systems provide a dual use of land for agriculture and photovoltaic energy generation, and have gained international prominence, but their potential in Brazil is still little explored. Agrivoltaic systems can represent an alternative to fight the high rates of food insecurity and energy poverty in the country. The current study focuses on four families from an association of organic producers in the Amazonas state. Two topologies of agrivoltaic systems were proposed within the scope of this study: an elevated system and a greenhouse. Data such as energy consumption, future plans of the association, agricultural practices, climatic conditions and irradiation data were collected to estimate the sizes of photovoltaic systems. The economic analysis considered risks of loss of agricultural productivity due to the shadow of agrivoltaic structures. The results reveal that, although the initial CAPEX may be higher than conventional installations, it remains within a reasonable range and the systems remain economically viable. Three scenarios of farmers' contribution to the initial investment were evaluated: 100, 80 and 60%. Even in the case where farmers contribute with 100% of the investment, the discounted payback is 7 years and 10 months. In this same scenario, the resulting NPV and IRR were R\$ 98,232.76 and 24.41%, respectively. Furthermore, synergy was observed between agrivoltaic systems and shared energy business models, which can take advantage of the existing association structure to enable the distribution of energy credits. The proposed individual project can directly benefit four riverside families and impact 82 consumer families, while supporting organic production in the Amazon region. Furthermore, the study can influence agrivoltaic applications in small scale farming contexts, and the need for more research on this topic was identified on a national context.

Keywords: Agrivoltaic systems, Economic analysis, Small-scale agriculture