



Universidade Federal de Alagoas

Campus de Engenharias e Ciências Agrárias



DECLARAÇÃO

Declaro formalmente que o Sr. Reynaldo Wongtschowski desempenhou um papel proeminente e participativo nas diversas fases do projeto de pesquisa intitulado "Sistema Agrofotovoltaico em Alagoas – Uma Integração Cana-de-Açúcar e Geração de Energia Fotovoltaica". O projeto foi concebido, implantado e monitorado com a sua participação ativa no âmbito do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas. A pesquisa foi financiada com recursos provenientes do Governo do Estado através da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas. O Experimento foi realizado com o apoio e no canavial da Usina Santa Clotilde em Rio Largo (AL).

A atuação destacada do Sr. Reynaldo Wongtschowski transcorreu ao longo do período compreendido entre março de 2020 até a presente data. Durante esse intervalo, ele demonstrou um envolvimento significativo nas diversas etapas do projeto, contribuindo de maneira substancial para seu desenvolvimento e êxito. Este documento tem como propósito reconhecer sua valiosa contribuição para o sucesso do empreendimento científico conduzido pela instituição.

Rio Largo, AL, 22 de janeiro de 2024

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Gaus Silvestre de Andrade Lima".

Prof. Gaus Silvestre de Andrade Lima

Diretor Geral – Campus CECA

ESTUDO DE RETORNO SOBRE ÁREA SOMBREADA POR USINA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA. POR HECTARE (10.000 m²)

ÁREAS	TESTE AGRO& SOLAR	TESTEMUNHA	DIFERENÇA	COMPARATIVO
	Área sombreada	Área não sombreada		
Produtividade	84,5 Toneladas por Hectare	59,1 Toneladas por Hectare	Mais 25,4 Tons por hectare	42,98% a mais
Receita Bruta por Hectare	R\$ 15.737,79	R\$ 11.007,14	R\$ 4.730,65	42,98%
Custo de Produção por Hectare	R\$ 11.277,99 (*)	R\$ 10.465,19	R\$ 812,80	7,77%
Lucro por Hectare	R\$ 4.459,80	R\$ 541,95	R\$ 3.917,85	722,92%
	Com mais 7% de ATR			
Receita Bruta por Hectare	R\$ 16.839,44	R\$ 11.007,14	R\$ 5.832,30	52,99%
Custo de Produção por Hectare	R\$ 11.277,99 (*)	R\$ 10.465,19	R\$ 812,80	7,77%
Lucro por Hectare	R\$ 5.561,45	R\$ 541,95	R\$ 5.019,50	926,19%
RESULTADO LEVA A CONCLUSÃO QUE A LUCRATIVIDADE POR HECTARE SOMBREADO PASSA DE 10 VEZES A DE ÁREA NÃO SOMBREADA				
(*) Custo maior com a colheita devido ao aumento de produtividade				

PROJETO AGROFOTOVOLTAICO: CECA-UFAL / FAPEAL / USINA SANTA CLOTILDE

Produtividade de colmos:
1^a soca (ciclo de 11 mês)

Primeiro Ano

Testemunha

59,1 t/ha (Média)

91 t/ha (média nas áreas laterais as placas fotovoltaicas)

69 t/ha (média nas áreas abaixo das placas fotovoltaicas)

84,5 t/ha (média da área sobre influência da sombra)



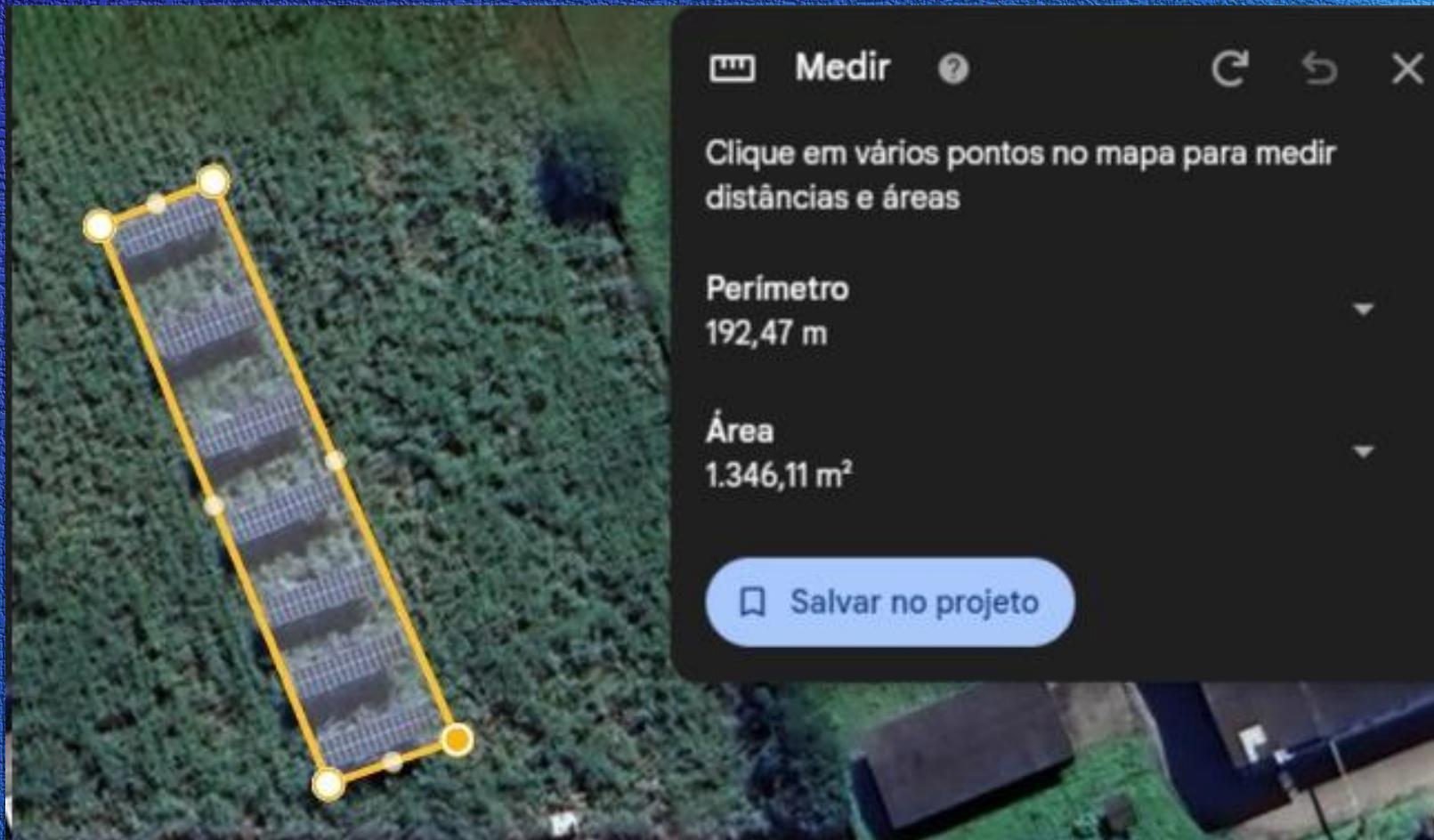
PROJETO AGROFOTOVOLTAICO: CECA-UFAL / FAPEAL / USINA SANTA CLOTILDE

Produtividade de colmos:

2ª soca (2023-2024)

Segundo Ano







Relatório Científico de Bolsa e Formulário de Acompanhamento¹

Número do processo: E-60030.0000001748/2022

1. Identificação do Relatório

Nome do(a) Bolsista: Ivandro Joel Bueno

Nome do(a) Orientador(a): Ricardo Araújo Ferreira Junior

Título do projeto: Sistema Agrofotovoltaico em Alagoas – uma integração cana-de-açúcar e geração de energia fotovoltaica

Período que se refere o Relatório: 19 / 09 / 2022 até 19 / 09 / 2023

[] Relatório Parcial

[X] Relatório Final

[] Relatório Reapresentado

Relatório Científico de Bolsa

1. Resumo

A necessidade crescente por energia e alimento, juntamente com a atenuação das mudanças no clima são pontos que têm incentivado a busca por fontes renováveis para a produção de energia, já que são limpas e sustentáveis. O sistema agrofotovoltaico (SAF) – combinação de um sistema solar fotovoltaico (FV) e produção vegetal em uma mesma área – tem sido sugerido como oportunidade para a geração sinérgica de energia renovável (energia fotovoltaica) e a produção de alimentos ou de biomassa para outros fins na mesma área, com possibilidade de ganho do uso da terra. Assim, essa pesquisa objetivou avaliar o desempenho do cultivo da cana-de-açúcar em associação à um sistema fotovoltaico no estado de Alagoas, visando um melhor entendimento desse sistema (SAF) e determinação da eficiência do uso da terra nessa condição.

Para isso foram registrados, armazenados, analisados e comparados os elementos agrometeorológicos como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar, coletados abaixo do sistema SAF, em uma área da mesma lavoura sem a influência do SAF e na estação meteorológica do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Também dados de radiação sobre os painéis são coletados e dados de crescimento e desenvolvimento das plantas. Reunindo todos os dados pode-se calcular no SAF, a produção de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos e a produção da cultura da cana-de-açúcar, comparando cada uma delas com a produção individual, da mesma lavoura sem a cobertura de painéis e de um sistema solar fotovoltaico convencional. Com isso pode-se comparar e calcular a eficiência do uso da terra com e sem o SAF.

2. Objetivos propostos no Projeto (Objetivo geral e específico)

Geral

O objetivo deste projeto será avaliar o crescimento da cultura da cana-de-açúcar cultivada em associação à um sistema fotovoltaico (sistema agrofotovoltaico, SAF) no estado de Alagoas, visando um melhor entendimento e determinação da eficiência do uso da terra nessa condição.

¹ O Relatório deverá ser entregue somente em formato PDF, devidamente assinado pelo(a) bolsista e orientador(a), e encaminhado para o e-mail informado no período de implementação da bolsa.

Específicos

- Determinação da produtividade da cana-de-açúcar associada a geração de energia fotovoltaica e comparar com a produtividade da área apenas com cana-de-açúcar;
- Determinação o balanço de radiação do sistema cana-de-açúcar e geração fotovoltaica;
- Determinação de variáveis de crescimento e biométricas das plantas de cana-de-açúcar submetidas ao cultivo associado com a geração fotovoltaica;
- Verificar a eficiência do uso da terra do sistema agrofotovoltaico com a cultura da cana.

2.1 Objetivos realizados (Relatar quais objetivos foram realizados. Justificar a modificação de algum dos objetivos específicos propostos, se houver)

O estudo neste projeto permitiu determinar a relação entre os elementos agrometeorológicos dentro e fora do sistema SAF; avaliar a melhor configuração dos painéis para este sistema, assim como a eficiência do uso da terra que as diferentes configurações do SAF alcançaram com a cultura da cana (no clico de primeira soca).

3. Metodologia (Relatar a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa. Justificar modificações metodológicas realizadas após o projeto aprovado, se houver)

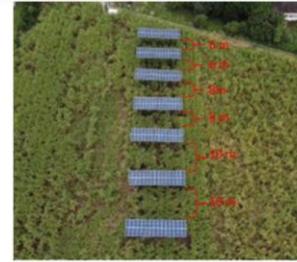
A pesquisa ocorreu na área adjacente ao CECA/UFAL, Rio Largo, Alagoas, com coordenadas geodésicas 09° 28' S; 35° 49' W e 127 metros acima do nível do mar. O clima dessa região é úmido, megátermico, com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno, segundo classificação de Thorthwaite & Mather (1955). As normais climatológicas da precipitação pluvial anual e temperatura do ar média anual são 1818 mm e 25,4 °C, respectivamente.

A pesquisa realizou a computação da irradiação solar global interceptada e a consequente geração de eletricidade por um sistema fotovoltaico em estruturas suspensas que possibilita ficar acima do cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*), variedade R892 579, assim estabelecendo o sistema agrofotovoltaico (SAF).

O SAF foi estabelecido com três configurações, com diferentes densidades de módulos fotovoltaicos. As estruturas que possibilitaram a elevação do sistema fotovoltaico são iguais em todos as configurações, uma unidade estrutural (stilt unit) com duas colunas e um eixo horizontal composto por longarinas de 15 metros, nas quais foram fixados os painéis fotovoltaicos. Cada unidade estrutural comporta duas fileiras com 15 módulos, totalizando 30 módulos, e foi replicada para um arranjo tal como definido no projeto do SAF.

As densidades de módulos fotovoltaicos foram estabelecidas em função da razão entre a área de painéis fotovoltaicos e a área de cultivo das plantas (cana-de-açúcar). Porém, como as unidades estruturais têm as mesmas áreas de módulos, as diferentes configurações foram definidas através dos espaçamentos entre estas estruturas. Assim, foram testadas as seguintes razões entre a área de módulos fotovoltaicos e a área de cultivo da cana 0,285, 0,33 e 0,40, as quais são proporcionadas pelos respectivos espaçamentos entre unidades estruturais, 10, 8 e 6 metros (Figura 1).

Figura 1. Visão aérea da área de campo do projeto agrofotovoltaico com destaque para os espaçamentos entre unidades estruturais.



Como análise integral do desempenho do Sistema Fotovoltaico (SAF) com a cultura da cana-de-açúcar, a razão equivalente de terra (RET) foi determinada. Esta é uma métrica, comumente, usada na literatura (Dupraz et al., 2011; Younas et al., 2019) para a avaliação da eficiência do uso da terra (EUT). Este índice expressa a produtividade da terra para as eficiências de energia elétrica e da cultura agrícola no SAF em relação à eficiência de energia elétrica (autônoma) e do sistema de cultivo tradicional usando a mesma área. O cálculo do RET é dado pela Equação 1:

$$\text{RET} = \frac{Y_{c_SAF}}{Y_{c_REF}} + \frac{Y_{e_SAF}}{Y_{e_REF}} \quad (1)$$

na qual: Y_{c_SAF} é a produtividade de colmos da cultura da cana-de-açúcar (Y_c) no SAF; Y_{e_SAF} é a geração de energia elétrica (Y_e) no SAF; Y_{c_REF} é a Y_c sem a influência do SAF, cultivo convencional (sem módulos fotovoltaicos); e Y_{e_REF} é a Y_e em uma usina convencional de FV (sem o SAF).

Para alcançar os objetivos supracitados, as avaliações do crescimento das plantas foram realizadas, mensalmente em cada densidades de módulos do SAF e áreas adjacentes que sofriam influência das sombras do FV. Estas avaliações foram por meio de medidas biométricas tais como: comprimentos e larguras das folhas para a determinação da área foliar (AF), altura das plantas, comprimento dos colmos industrializáveis, números de perfis (número de plantas por metro), número de folhas abertas (expandidas completamente) com pelo menos 20% de área verde e números de folhas secas. O índice de área foliar (IAF) será obtido como a razão entre a AF e a área ocupada pelas plantas (AS). Estas variáveis foram estimadas para escala diária através ajustes de funções matemáticas, por programa computacional, em relação aos dias do ano, dias após o plantio ou graus-dia acumulado programa computacional.

A produtividade agrícola ou toneladas de colmos por hectare (TCH) foi determinada com auxílio de um dinamômetro, com capacidade para 40 kg. Para isso, foram amostradas 12 amostras com 12 m² de cada ambiente: 1) área de cultivo do SAF; 2) área de cultivo de referência (testemunha). As análises das variáveis agroindustriais foram realizadas no Laboratório da Usina Santa Clotilde.

A caracterização agrometeorológica, do novo microambiente de cultivo proporcionado pelo estabelecimento do sistema fotovoltaico, foi através de medidas das seguintes variáveis: radiação solar, temperatura do ar e do solo, umidade do ar, velocidade do vento e umidade do solo. Os elementos agrometeorológicos foram monitorados por sensores automáticos localizados na área de cultivo (abaixo do sistema fotovoltaico), acoplados a sistemas automáticos de aquisição de dados (*datalogger*), com medidas e médias em intervalos de tempo programáveis, geralmente de 10 segundos e 10 minutos, respectivamente.

No ambiente de cultivo externo ao SAF, que foi a referência para comparações de crescimento e fisiologia das plantas, a caracterização do ambiente foi pelos dados meteorológicos da estação agrometeorológica, próxima à área da pesquisa, situada no CECA/UFAL e com um trípode meteorológico auxiliar no cultivo supracitado.

4. Cronograma de Atividades (Conforme o cronograma proposto, em que momento o projeto se encontra?)													
Atividades	Ano	Ano 2											
		Meses	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Revisão de literatura	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Coleta, processamento e análise de dados agrometeorológicos e biométricos da cultura.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Adaptar modelos agrometeorológicos		x	x	x	x								
Determinar a eficiência do Uso da Terra		x	x	x									
Análise e discussão conjunta de resultados		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Relatório Final (Crescimento das plantas, Produção de Eletricidade, Meteorológicos, Eficiência do uso da Terra)						x	x	x					
Justificar atrasos na execução, (se houver):													

5. Desenvolvimento do Projeto (Delinear a execução do projeto de pesquisa, no período de abrangência do relatório, descrevendo eventuais desvios verificados com relação ao projeto aprovado)
Andrade do microambiente (microclima) proporcionado pelo SAFV
Foram realizadas coleta, armazenamento de elementos agrometeorológicos como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar e radiação solar, dentro e fora do

sistema agrofotovoltaico. Os dados obtidos foram comparados e analisados para se obter a interferência do sistema nos mesmos.

A comparação das variáveis meteorológicas entre os ambientes estudados – a área do SAF, área de cultivo de referência (REF) e estação meteorológica do CECA (EM), foi feita a partir da análise correlação e indicadores estatísticos. Os indicadores estatísticos utilizados foram o coeficiente de correlação (*r*), o índice de concordância de Willmont (*d*) proposto por Willmont et al. (1985) e o coeficiente de confiança ou desempenho (*c*) proposto por Camargo & Sentelhas (1997). A classificação do desempenho baseou-se no indicador estatístico (*c*), sendo os demais indicadores utilizados apenas para o cálculo de *c*.

O índice de Willmont (*d*), proposto por Willmont et al. (1985) é determinado pela Equação 4:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Pi - Oi)^2}{\sum (Pi - Oi + |Oi - Pi|)^2} \right] \quad (4)$$

em que: *Pi* corresponde ao valor de um elemento meteorológico (temperatura do ar, umidade relativa do ar ou velocidade do vento) obtidos em um ponto de referência, e *Oi* corresponde aos valores destes mesmos elementos encontrados em uma área de observação.

O coeficiente de confiança ou desempenho (*c*) é obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação (*r*) e o índice de Willmont (*d*), conforme a Equação 5:

$$c = r \cdot d \quad (5)$$

que, de acordo com os referidos autores, é interpretado como "ótimo" para (*c* > 0,85); "muito bom" para (*c* entre 0,76 a 0,85); "bom" para (*c* entre 0,66 a 0,75); "mediano" para (*c* entre 0,61 a 0,65); "sofrível" para (*c* entre 0,51 a 0,60); "mau" para (*c* entre 0,41 a 0,50) e "péssimo" para (*c* < 0,40).

Eficiência do uso da terra

Com a finalidade de simplificar a avaliação e fornecer uma unidade base para mensurar e comparar os resultados a serem obtidos, as simulações realizadas para cada configuração do SAF consideraram uma distribuição dos módulos em uma área de 1 hectare. Quatro configurações de sistema de produção energia fotovoltaica foram simulados utilizando o software PVsyst, com as seguintes características em comum: a inclinação dos módulos em 10°, orientação Norte, cada unidade estrutural (*shed*) com espaçamento transversal de 1 m entre si e composto por 30 módulos fotovoltaicos, sendo 2 fileiras de 15 módulos dispostos com orientação retrato.

A primeira configuração é relativa a um sistema fotovoltaico (SF) de referência (SF-ref) que se encontra próximo ao solo a uma altura de 2 m e possui espaçamento de 2 m entre suas estruturas, otimizando o uso da terra para produção de eletricidade (conforme usinas fotovoltaicas convencionais). Nesse caso, as características do sistema podem não ser suficientes para proporcionar uma produção agrícola lucrativa sob suas estruturas (Dupraz et al., 2011). Esta configuração resultou em uma taxa de ocupação do solo de 0,66 e será considerada como a densidade máxima, ou seja, que permite a disposição do maior número de módulos na unidade de área (1 hectare) de modo que o auto sombreamento não prejudique sua eficiência. As outras três configurações são extrapolações para um hectare das configurações estabelecidas no campo pelo projeto agrofotovoltaico instalado, com altura de 7 m (Figura 2A) e espaçamento de 6, 8 e 10 m entre suas estruturas (Figura 1 e Figura 2B).



Figura 2. Vista aérea do sistema agrofotovoltaico instalado em Rio Largo – AL.

As quatro configurações foram simuladas no software PVsyst, considerando um período de ciclo do cultivo da cana-de-açúcar (outubro de 2022 a agosto de 2023) e para o período de um ano (período médio do ciclo do cultivo da cana-de-açúcar na região). Posteriormente, foram realizados os cálculos de eficiência do uso da terra (EUT), através do índice chamado de Razão equivalente de Terra (RET), comumente usado na literatura (Dupraz et al., 2011; Younas et al., 2019). Este índice expressa, no caso da pesquisa em questão, a produtividade (relativa) da terra para geração de eletricidade e a produtividade (relativa) da cultura agrícola no SAF em relação à geração de eletricidade (autônoma) e à produtividade sistema de cultivo tradicional usando a mesma unidade de área, sendo obtido por:

$$RET = Yc_{relativa} + Ye_{relativa} \quad (2)$$

em que: *Yc_relativa* = *Yc_SAF/Yc_REF*; *Ye_relativa* = *Ye_SAF/Ye_REF*.

Os valores de produção por área (produtividades ou eficiências -, t ha⁻¹) da cultura da cana-de-açúcar para as diferentes configurações de SAF (*Yc_SAF*) - foram determinados através de amostragens da massa fresca de colmos industriáveis e extrapoladas para toneladas por hectare, para cada configuração. Também foi determinada a eficiência (produtividade de colmos, t ha⁻¹) da cultura da cana-de-açúcar do cultivo de referência (sem a influência do SAF).

6. Resultados Técnicos e Acadêmicos obtidos (Em função dos objetivos propostos em seu projeto, analise os resultados obtidos)

Analise do microambiente (microclima) proporcionado pelo SAFV

Verificou-se que os elementos meteorológicos temperatura do ar e umidade relativa do ar não tiveram variações significantes abaixo do sistema agrofotovoltaico em comparação a uma área de controle para este. O elemento velocidade do vento teve uma variação notável dentro do sistema, em comparação à área de controle, isso devido provavelmente à influência

das placas. Observação: até o momento de redação deste relatório os dados do elemento radiação solar ainda não haviam sido tabulados e analisados.

Tabela 1: Médias mensais da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) no sistema agrofotovoltaico, cultivo de referência (REF) e na estação meteorológica (EM).

Mês	Mínimas			Máximas			Média		
	SAF	EM	REF	SAF	EM	REF	SAF	EM	REF
Out	20,24	20,74	-	30,16	29,63	-	24,60	24,67	-
Nov	24,86	24,89	-	30,72	30,10	-	25,20	25,24	-
Dez	21,01	21,71	-	31,50	30,94	-	25,61	25,68	-
Jan	20,88	21,57	-	31,54	30,86	-	25,62	25,63	-
Fev	21,49	21,77	21,78*	31,00	30,48	31,29*	25,67	25,63	25,45*
Mar	21,71	22,08	21,78*	31,47	30,99	31,86*	25,78	25,81	25,68*
Abr	21,77	22,23	21,70	31,05	30,36	31,42	25,51	25,56	25,51

* 11 dias de dados; + 24 dias de dados coletados; outubro são 20 dias de dados coletados em todos os pontos.

Em relação à variável umidade relativa do ar, também não se identificou diferenças substanciais, e, da mesma forma como na variável temperatura do ar, foram comparados os dados obtidos na estação meteorológica do campus CECA com a estação abaixo do SAF, e a partir do mês de março, também com a estação localizada na área de cultivo de referência. Pode-se observar os dados obtidos abaixo, através da Tabela 2.

Tabela 2: Médias mensais da umidade relativa do ar (UR, %) no sistema agrofotovoltaico (SAF), cultivo de referência (REF) e na estação meteorológica (EM).

Mês	Mínimas			Máximas			Média		
	SAF	EM	REF	SAF	EM	REF	SAF	EM	REF
Out	53,06	56,46	-	98,28	97,69	-	80,69	81,93	-
Nov	56,58	60,19	-	98,35	98,11	-	83,12	84,11	-
Dez	51,92	54,73	-	98,09	97,53	-	81,15	81,57	-
Jan	51,95	53,84	-	98,42	97,85	-	81,00	81,28	-
Fev	54,78	56,99	-	98,46	98,10	-	82,96	83,3	-
Mar	54,27	56,01	53,27*	98,23	97,79	98,03*	82,70	82,65	82,89*
Abr	60,40	62,09	58,51	98,55	98,24	98,55	86,20	86,10	85,97

*24 dias de dados coletados; outubro são 20 dias de dados coletados em todos os pontos.

A variável velocidade do vento foi comparada somente entre a estação meteorológica do CECA e a estação móvel abaixo do SAF observando-se uma variação maior do que observada nas variáveis meteorológicas anteriores, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Médias mensais da velocidade do vento em (m s^{-1}) no sistema agrofotovoltaico (SAF) e na estação meteorológica (EM).

Mês	média		máxima	
	SAF	EM	SAF	EM
Out*	1,15	1,66	4,26	3,95
Nov	1,20	1,61	4,10	3,65
Dez	1,18	1,68	4,18	3,95

Jan	0,96	1,59	3,84	3,85
Fev	0,76	1,42	3,54	3,64
Mar	0,61	1,47	3,23	3,85
Abr	0,31	1,30	2,17	3,38

*Outubro são 20 dias de dados coletados em todos os pontos.

Índices estatísticos

Os indicadores estatísticos, coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmont (d) e coeficiente de confiança ou desempenho (c) foram utilizados para os elementos meteorológicos temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, entre os diferentes pontos, sistema agrofotovoltaico (SAF) e estação meteorológica (EM), SAF e cultivo de referência (REF) e entre REF e EM. Os valores encontrados, a classificação do coeficiente c , juntamente com o período número de dias n estão listados na Tabela 4. Pode-se observar pelo coeficiente de confiança ou desempenho (c) que os elementos meteorológicos temperatura do ar, umidade relativa do ar não tiveram variação substancial, com coeficientes acima de 0,85. Apenas a velocidade do vento sofreu influência do SAF, devido a interferência direta das placas fotovoltaicas e outros aparelhos físicos (edificações, árvores etc.). Os coeficientes estatísticos foram abaixo de 0,41.

Tabela 4: Coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmont (d) e coeficiente de confiança ou desempenho (c) e sua classificação para os elementos meteorológicos Temperatura do ar (Ta); umidade relativa do ar (UR); velocidade do vento (VV) obtidos entre os pontos analisados (Sistema Agrofotovoltaico - SAF, Estação meteorológica - EM e Cultivo de Referência - REF) com seus respectivos períodos em dias.

Analizado entre	Período entre n (dias)	Elemento	r	D	c	Classificação
		Ta ($^{\circ}\text{C}$)				
SAF e EM	200	UR (%)	0,993	0,994	0,987	ótimo
		VV (ms^{-1})	0,765	0,534	0,408	mau
SAF e REF	66	Ta ($^{\circ}\text{C}$)	0,997	0,998	0,995	ótimo
		UR (%)	0,999	0,998	0,997	ótimo
EM e REF	65	Ta ($^{\circ}\text{C}$)	0,993	0,996	0,989	ótimo
		UR (%)	0,998	0,998	0,996	ótimo

Também pode-se observar graficamente as correlações dos elementos meteorológicos entre os diferentes pontos de observação através das Figuras 3 a 6. Assim como demonstrado pelo coeficiente de confiança ou desempenho (c), através dos gráficos de regressão, observa-se também a proximidade dos valores dos elementos meteorológicos da temperatura do ar e umidade relativa do ar em comparação entre os três pontos de medição: o próprio SAF, a estação meteorológica e a área de cultivo de referência. Somente em relação a velocidade do vento é que se demonstra uma maior variação.

Figura 3: Comparação entre variáveis atmosféricas no sistema agrofotovoltaico (SAF) e cultivo de referência (REF): A) Temperatura do ar (Ta, $^{\circ}\text{C}$); B) Umidade relativa do ar (%).

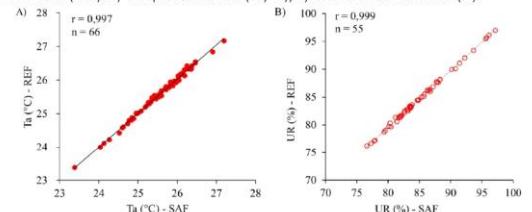


Figura 4: Comparação entre variáveis atmosféricas no sistema agrofotovoltaico (SAF) e na estação meteorológica (EM): A) Temperatura do ar (Ta, $^{\circ}\text{C}$); B) Umidade relativa do ar (%).

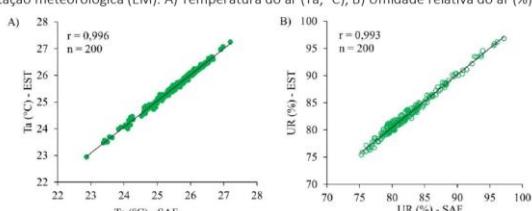


Figura 5: Comparação entre variáveis atmosféricas na estação meteorológica (EM) e cultivo de referência (REF): A) Temperatura do ar (Ta, $^{\circ}\text{C}$); B) Umidade relativa do ar (%).

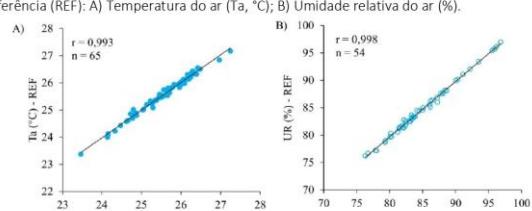
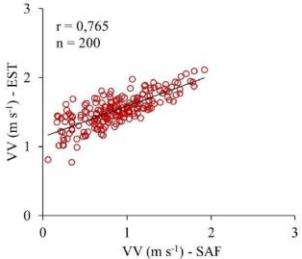


Figura 6: Comparação entre a velocidade do vento (VV, m s⁻¹) no sistema agrofotovoltaico (SAF) e na estação meteorológica (EM).



Com todos os dados meteorológicos obtidos e analisados, considerando todo o ambiente e os pontos de medição adotados, evidencia-se que o ambiente do Sistema Agrofotovoltaico não é alterado em relação a temperatura e umidade do ar, tendo apenas uma alteração na velocidade do vento.

Vale destacar que foi notável no período mais chuvoso da localidade que a umidade do ambiente de cultivo foi bastante elevada. Esta umidade está sendo analisada como um fator que favoreceu a incidência da praga cigarrinha (*Mahanarva fimbriolata*), bastante observadas próxima a época de colheita das plantas. Esta praga pode comprometer até bastante a produção (até 60%), por isso é uma das principais ameaças da lavoura de cana-de-açúcar. Assim, os dados, do período mais chuvoso serão processados e analisados em breve.

Eficiência do uso da terra (EUT)

As quatro configurações simuladas no software PVsyst estão representadas na Figura 7, sendo a região verde equivalente a 1 hectare. Os dados de energia elétrica produzida por esses sistemas obtidos com as simulações consideram um período de um ano e estão presentes na Tabela 5, assim como as principais características de cada configuração.

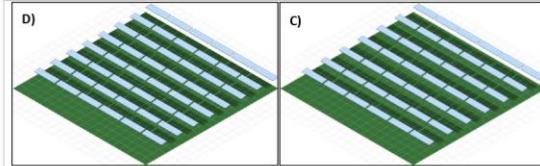
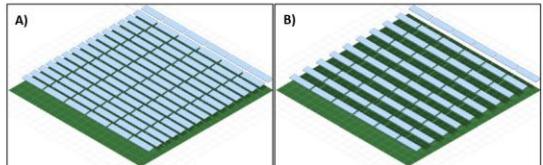


Figura 7. Distribuições espaciais das configurações através do software PVsyst para as densidades de módulos por hectare que proporcionam as taxas de ocupação do solo de A) 0,66 (SF-Ref. 0,66); B) de 0,39 (SAF-0,39); C) de 0,33 (SAF-0,33); e D) de 0,28 (SAF-0,28). Obs. SF-Ref é o Sistema fotovoltaico de referência, isto é, com a densidade de módulos utilizada em uma usina fotovoltaica consencional.

Tabela 5. Características dos sistemas fotovoltaicos usado para as estimativas de razão equivalente de terra (RET) do Sistema Agrofotovoltaico (SAF) para as densidades de módulos por hectare que proporcionam as taxas de ocupação do solo de 0,66 (SF-Ref. 0,66), de 0,39 (SAF-0,39), de 0,33 (SAF-0,33) e de 0,28 (SAF-0,28). Obs. SF-Ref é o Sistema fotovoltaico de referência, isto é, com a densidade de módulos utilizada em uma usina fotovoltaica consencional.

SF-Ref. (0,66)	SAF-0,39	SAF-0,33	SAF-0,28	
Nº de Módulos /ha	2880	1800	1440	1260
Potência Nominal (kWP)	979	612	490	428
Nº de unidades (Sheds)	96	60	48	42
Módulos per Shed	30	30	30	30
Espaçamento Longitudinal	2	6	8	10
Espaçamento Transversal	1	1	1	1
Taxa de Ocupação do Solo (GCR)	66%	39%	33%	28%
Energia Produzida (MWh/ano)	1.604	1003	803	705
Energia Produzida (MWh/11 mês*)	1.470	919	736	646

*tempo do cultivo de cana-de-açúcar no ciclo em avaliação (outubro de 2022 a agosto de 2023).

As gerações de energia elétrica nas 3 configurações (densidade de módulos) no SAF (Ye_SAF) em relação à geração de energia elétrica em uma usina convencional de FV (Ye_REF) apresentaram as seguintes produtividades relativas (Ye_relativa em porcentagem): 62,5%, 50% e 44%, respectivamente da maior para a menor densidade de módulos (Tabela 6). Já quando se analisou-se as produtividades relativas da cana-de-açúcar (Yc_relativa = produtividade de colmos frescos industriáveis nos ambientes com SAF em relação ao ambiente sem influência do SAF), observaram-se ganhos de eficiências de 6%, 23% e 19%, respectivamente para as taxas de ocupação do solo de 0,39; 0,33 e 0,28 (Figura 8).



Figura 8. Imagem aérea do projeto agrofotovoltaico com as produtividades nas diferentes densidades de módulos que proporcionam as taxas de ocupação do solo de 0,39 (SAF-0,39), de 0,33 (SAF-0,33) e de 0,28 (SAF-0,28) e a produtividade da área que teve o cultivo de referência (testemunha).

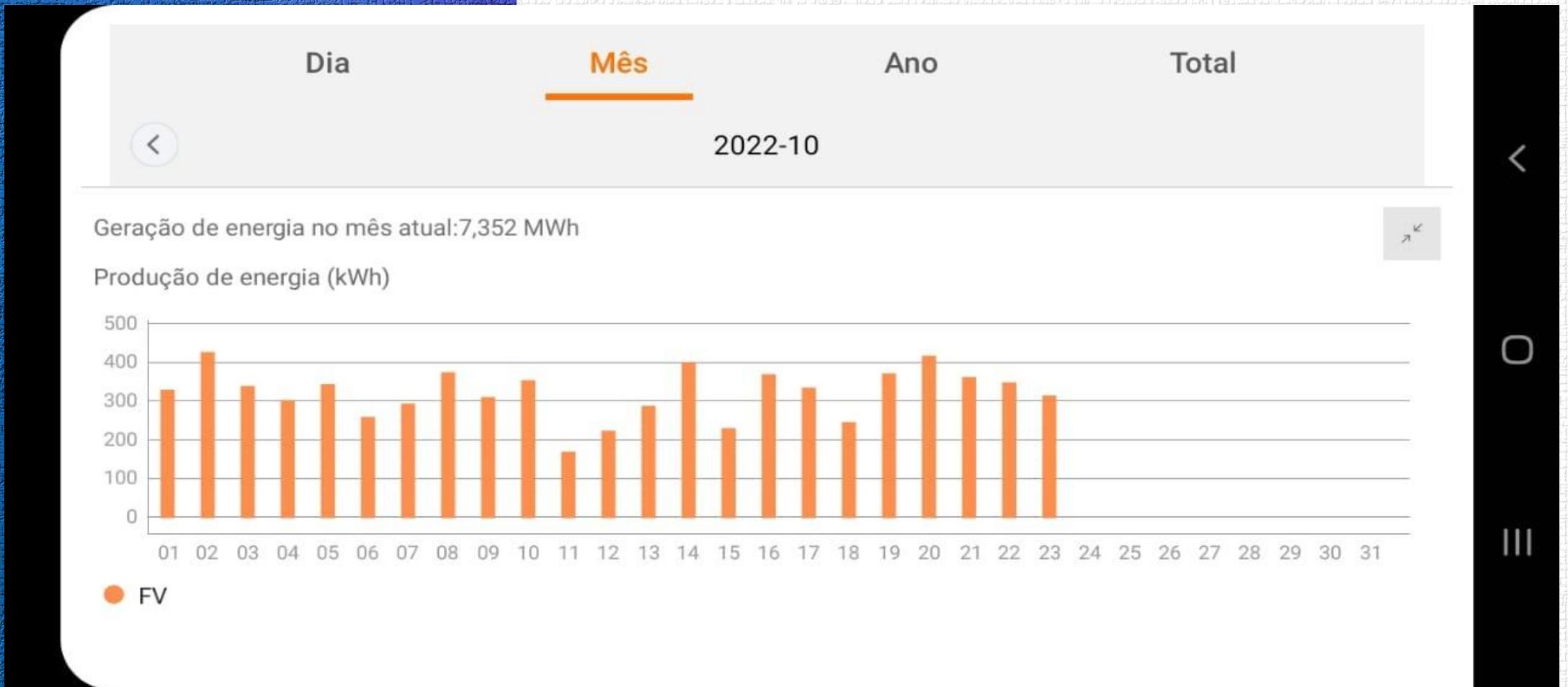
Após a computação das eficiências relativas de geração de eletricidade e de colmos, as eficiências do uso da terra (EUT) foram determinadas através do RET (Tabela 6). A configuração do SAF com a taxa de ocupação do solo de 0,33 (SAF-0,33) teve a EUT maior com valor de RET igual a 1,73, apesar de ter gerado menor eletricidade que o SAF-0,39, esta densidade de módulos teve a produtividade de colmos maior, o que resultou na maior RET.

Tabela 6. Produtividade de colmos (Yc), Produtividade de eletricidade (Ye), Yc relativa (Ye_SAF/Yc_REF), Ye relativa (Ye_SAF/Ye_REF) e razão equivalente de terra (RET) do Sistema Agrofotovoltaico (SAF) para as densidades de módulos por hectare que proporcionam as taxas de ocupação do solo de 0,39 (SAF-0,39), de 0,33 (SAF-0,33) e de 0,28 (SAF-0,28). Obs. REF (referência) representa: 1) o cultivo de cana-de-açúcar sem a influência do SAF; 2) o sistema fotovoltaico de referência com taxas de ocupação do solo 0,66.

	REF	SAF-0,39	SAF-0,33	SAF-0,28
Produtividade de colmos Yc (t ha ⁻¹)	59,1	63,6	72,4	70,6
Produtividade de eletricidade Ye (MWh ha ⁻¹)	1.470,0	919,0	736,0	646,0
Yc_relativa	-	1,08	1,23	1,19
Ye_relativa	-	0,63	0,50	0,44
Razão Equivalente de Terra (RET)	-	1,70	1,73	1,63

É importante ter a ciência, que os resultados obtidos precisam ser considerados preliminares, visto que a, elevada variabilidade anual das produtividades da cultura da cana sugere de repetições de observações para resultados mais assertivos. Assim, as avaliações de outros ciclos da cultura, no ambiente do SAF, são fundamentais para o melhor entendimento desta nova forma de uso da terra.

GERAÇÃO FOTOVOLTAÍCA NO MÊS DE OUTUBRO DE 2022



Cenários

Perda bilionária de produtores de cana

As receitas dos produtores de cana-de-açúcar do Centro-Sul do país foram menores que as despesas na safra 2023/24, segundo um estudo da Organização de Associações de Produtores de Cana do Brasil

(Orplana), que informa que os agricultores tiveram prejuízo de R\$ 17,3 por tonelada. Somadas, as perdas foram de mais de R\$ 1 bilhão, afirma a entidade.

valor.com.br/agro

tecnologia Modelo que está em teste em Minas Gerais reúne, numa mesma área, a geração de energia agrofotovoltaica e cultivos como melão, morango, feijão e alface

Brasil dá os primeiros passos para integrar agricultura e energia solar

Cleyton Vilarino
De São Paulo

Pioneiro na integração entre lazer, pecuária e floresta, Brasil está dando os primeiros passos para adotar mais um modo que reúne, numa mesma área, mais uma produção: a geração de energia agrofotovoltaica.

Diferente do modelo tradicional, no qual os módulos de geração de energia solar são instalados dentro do solo exigindo o suprimento da vegetação e inviabilizando uso agropecuário, o que será testado em Minas Gerais reúne, no mesmo espaço, as duas atividades. O modo foi desenvolvido na Europa por pesquisadores alemães e alvo de estudos em Pernambuco e Alagoas.

Criado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epmig) em parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) e com o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Telecomunicações (Cpd), o projeto é financiado pela Agência Nacional de Energia Elétrica e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapres).

Será realizado em catorze módulos com área entre 30 e 400 metros quadrados cada. Sob as placas, serão plantadas melão, morango, feijão e alface, além de pastagem para criação e bovinos.

"Estamos ainda na fase de definição da infraestrutura das placas, altura, largura entre as fileiras, para respeitar a ressیدdade de luz das culturas. Mas pela previsão do projeto, até dia essa

estrutura provavelmente já vai estar em campo", afirma a coordenadora do projeto, Polyanna Mara de Oliveira.

Ela acrescenta que a intenção é "entregar ao produtor um modelo sustentável de produção agrofotovoltaica. Ele vai entender sobre qual altura colocar os módulos, o custo inicial, em quanto tempo ter o retorno do investimento, as culturas adaptadas, as mais vantajosas e os impactos ambientais, sociais e econômicos desse sistema".

Em Pernambuco, um projeto semelhante, mas de menor escala, mostrou-se promissor em 2019 — sobretudo em áreas de semiárido. Instalado em uma unidade demonstrativa na escola de agroecologia Serta, em Ibirim, sob coordenação do Instituto Agronômico de Pernambuco (Iapar), o módulo de 24 metros quadrados contou com 10 placas fotovoltaicas com potência nominal total de 3,3 kilowatts (kW) instaladas a aproximadamente dois metros do solo, abrigando sob ele um sistema de aquaponia onde foram cultivadas hortaliças, peixes e um galinheiro.

Segundo o instituto, em um ano o sistema produziu 4,8 mil kWh de energia, cerca de 130 quilos de peixes, 730 unidades de ovos, 336 quilos de hortaliças e 200 unidades de mudas de plantas nativas — o equivalente a R\$ 10,4 mil após um custo de implantação de R\$ 20 mil. Além disso, o estudo mostrou que o sombreamento promovido pelos painéis fotovoltaicos resultou em uma economia de água de 14% a 29% quando comparado ao cultivo

Como funciona a energia agrofotovoltaica
Comparação entre o sistema convencional e combinado de geração de energia e produção de alimentos

Monocultivo

Plantio de uma única espécie sem sombreamento tende a levar à perda de mais água por evapotranspiração



OU



OU

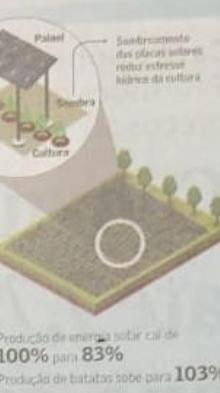


Foto: Instituto Fraunhofer (DE)

de hortaliças isoladamente.

Em Alagoas, professores do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal local (Ufal) avaliam desde 2012 a viabilidade do modelo agrofotovoltaico em lavouras de cana-de-açúcar. Com financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas, sete estruturas com 210 painéis fotovoltaicos foram instaladas na Usina Santa Clotilde, em Rio Largo, com um potencial de geração de nove megawatts-hora (MWh) por mês.

Neste caso, também foi observado o aumento da produtividade do canavial no primeiro ano quando comparado ao cultivo convencional: de 6% a 23%, a depender da quantidade de módulos fotovoltaicos instalados no sistema.

Segundo o presidente da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), Rodrigo Sauaia, a adoção de sistemas agrofotovoltaicos ainda é pequena no Brasil, mas com potencial para crescer. "Eu acho que é um mercado que ainda tem muito espaço para se desenvolver, está numa fase inicial no Brasil. É um modelo de aplicação que o setor solar está se familiarizando mais porque é uma tecnologia que tem saído com sucesso da pesquisa, entrado cada vez mais na aplicação e estamos nessa etapa transitória".

A associação calcula que existam 196 mil sistemas de geração de energia solar em áreas rurais do Brasil atualmente, o que representa 8,8% do total existente no país, com uma potência instalada de 3,6 gigawatts (GW).

"Isso significa que 14,6% de todos os investimentos em energia solar de pequeno e médio porte no Brasil estão sendo feitos por produtores rurais. Eles são o terceiro maior usuário de energia solar do país, logo depois de residenciais e pequenos negócios", detalha Sauaia.