



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**GABRIEL MARÇAL DA CUNHA PEREIRA CARVALHO**

**USO DE SISTEMAS AGRIVOLTAICOS PARA GERAÇÃO DE RENDA EM ÁREAS  
SUSCEPTÍVEIS A DESERTIFICAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2023**

GABRIEL MARÇAL DA CUNHA PEREIRA CARVALHO

USO DE SISTEMAS AGRIVOLTAICOS PARA GERAÇÃO DE RENDA EM ÁREAS  
SUSCEPTÍVEIS A DESERTIFICAÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C978u Carvalho, Gabriel Marçal da Cunha Pereira.  
Uso de sistemas agrivoltaicos para geração de renda em áreas susceptíveis a desertificação / Gabriel Marçal da Cunha Pereira Carvalho. – 2023.  
88 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.
1. Agrivoltaics. 2. Geração distribuída. 3. Áreas Suscetíveis a Desertificação. 4. Energia solar fotovoltaica. 5. Geração de renda. I. Título.

CDD 621.3

---

GABRIEL MARÇAL DA CUNHA PEREIRA CARVALHO

USO DE SISTEMAS AGRIVOLTAICOS PARA GERAÇÃO DE RENDA EM ÁREAS  
SUSCEPTÍVEIS A DESERTIFICAÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Sistemas Elétricos de Potência.

Aprovada em: 29 de Setembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo  
Antunes (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Edílson Mineiro Sá Junior  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia  
do Ceará (IFCE)

---

Prof. Dr. Menaouar Berrehil El Kattel  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sua capacidade de confiar e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram a força necessária. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa batalha. Beatriz, você me referencia em minhas atitudes.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, pela educação e confiança.

A Isadora, pelo amor e companheirismo incondicional.

Ao Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes, pela orientação, amizade e pelas diversas oportunidades de engrandecer minha carreira.

Ao Caio Braga e Bruno Wendell, pelo apoio neste trabalho e pela amizade fiel. Aos doutores e professores participantes da banca examinadora, Menaouar Berrehil El Kattel, Edílson Mineiro Sá Júnior e Claudivan Feitosa de Lacerda, pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

A população brasileira, pela oportunidade de concluir mais uma etapa da área acadêmica em uma universidade pública gratuita e de qualidade. Os esforços aqui empregados são para retribuir minimamente a confiança em mim depositada.

"Esqueça felicidade, busque significado."  
(Søren Kierkegaard)

## RESUMO

A energia solar fotovoltaica tem crescido no Brasil, especialmente no Ceará, impulsionada pela redução dos custos e interesse dos setores agrícola e pecuarista. Os sistemas agrivoltaicos combinam agricultura e energia solar, trazendo benefícios como geração de renda adicional, redução de emissões de  $CO_2$  e recuperação de áreas degradadas suscetíveis à desertificação. Essa abordagem integra produção de alimentos e energia renovável, contribuindo para a transição energética justa. O sistema agrivoltaico proposto utiliza de uma cultura adaptada à caatinga (feijão-de-corda), captação de água da chuva e redução da emissão de carbono. Associado a implantação do sistema, sugere-se a implementação de um programa estadual que irá gerar renda para retirar os beneficiários da linha da pobreza. O estudo de caso mostra que é viável a gerar mais de R\$ 1.345 reais mensais para uma família com quatro residentes situada em Moraújo, Ceará, com um sistema agrivoltaico de 88 kWp. Em um cenário de expansão do programa, nota-se que seria possível realizar 494 projetos de mesmo porte com um investimento inicial de R\$ 262,7 milhões de reais.

**Palavras-chave:** agrivoltaicos; geração distribuída; áreas suscetíveis a desertificação; energia solar fotovoltaica; geração de renda.



## ABSTRACT

Solar photovoltaic energy has been growing in Brazil, especially in Ceará, driven by cost reduction and the interest of the agricultural and livestock sectors. Agrivoltaic systems combine agriculture and solar energy, bringing benefits such as additional income generation, reduction of  $CO_2$  emissions, and recovery of degraded areas susceptible to desertification. This approach integrates food production and renewable energy, contributing to a fair energy transition. The proposed Agrivoltaic system uses a crop adapted to the caatinga (cowpea), rainwater harvesting, and carbon emission reduction. Along with the system's implementation, it is suggested to implement a state program that will generate income to lift the beneficiaries out of poverty. The case study shows that it is feasible to generate over R\$ 1,345 Brazilian reais monthly for a four-resident family located in Moraújo, Ceará, with an 88 kWp Agrivoltaic system. In an expanded program scenario, it is noted that it would be possible to carry out 494 projects of the same size with an initial investment of R\$ 262.7 million Brazilian reais.

**Keywords:** agrivoltaic; distributed generation; areas susceptible to desertification; photovoltaic solar energy.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Irradiação Global Horizontal Anual.....	18
Figura 2 – Curva característica I-V e curva de potência-tensão (P-V) para um módulo com potência nominal de 100Wp .....	24
Figura 3 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25 °C .....	24
Figura 4 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de 1.000 W/m <sup>2</sup> , espectro AM 1,5.....	25
Figura 5 – Diferença entre um módulo comum e um <i>half-cell</i> .....	26
Figura 6 – Mapa global de irradiação horizontal mostrando 49 estudos de casos de sistemas agrivoltaicos implantados.....	37
Figura 7 – Linha do tempo da implementação de sistemas agrivoltaicos. ....	37
Figura 8 – Efeito da intensidade de radiação sobre a taxa de fotossíntese líquida de milho ( <i>maize</i> ) e de trigo ( <i>wheat</i> ) e algodão ( <i>cotton</i> ). ....	44
Figura 9 – Área suscetível à desertificação no Brasil.....	48
Figura 10 – Núcleos de áreas suscetíveis a desertificação.....	49
Figura 11 – Mapa - Feijão - Valor da produção (Mil Reais). ....	53
Figura 12 – Disposição do cultivo de mudas. ....	54
Figura 13 – Disposição do plantio .....	55
Figura 14 – Fluxograma de implantação do método AHP.....	56
Figura 15 – Fluxograma de implantação do método TOPSIS-2N .....	56
Figura 16 – Proximidade relativa da solução ideal por municípios.....	59
Figura 17 – Diagrama esquemático do projeto projeto APV-MaGa .....	60
Figura 18 – Características do sistema fotovoltaico.....	61
Figura 19 – Modelagem tridimensional do sistema .....	61
Figura 20 – Modelagem tridimensional do sistema agrivoltaico.....	62
Figura 21 – Fluxograma de implantação do programa.....	65
Figura 22 – Instalação do sistema agrivoltaico. ....	66
Figura 23 – Fluxograma de funcionamento do programa após a implantação.....	67
Figura 24 – Sistema agrivoltaico instalado. ....	68
Figura 25 – Fluxo de energia elétrica e dinheiro do programa.....	69
Figura 26 – Modelagem do arranjo fotovoltaico no PVsyst.....	70

Figura 27 – Diagrama de perdas do sistema modelado.....	72
Figura 28 – Fluxo de caixa do ano 0 ao ano 9 .....	76
Figura 29 – Fluxo de caixa do ano 10 ao ano 21 .....	76
Figura 30 – Ganho mensal médio familiar.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tarifas TUSD por subclasses tarifárias da Enel Ceará .....	36
Tabela 2 – Principais culturas tolerantes a sombra.....	44
Tabela 3 – Interferências de um sistema agrivoltaico.....	45
Tabela 4 – Dados de irradiação global, energia injetada e quociente de performance do sistema simulado. ....	71
Tabela 5 – Premissas de tarifa de energia adotada .....	73
Tabela 6 – Parâmetros do fluxo de caixa.....	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR	Ambiente de Contratação Regulada
AHP	Analytic Hierarchy Process - Processo de Hierarquia Analítica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASD	Áreas suscetíveis a desertificação
CAPEX	Capital Expenditure - Despesas de Capital
CNPJ	Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CPF	Cadastro de Pessoa Física
ET	Evapotranspiração
FIT	Feed-in tariff - Tarifa subsidiada
Funceme	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IGH	Irradiância Global Horizontal
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCA	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPECE	Instituto de Pesquisa do Ceará
LCOE	Levelized cost of electricity - Custo Nivelado de Eletricidade
LDN	Neutralidade da Degradação da Terra
MLPE	Module-Level Power Electronics - Eletrônica de Potência em Nível de Módulo
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
MPPT	Maximum Power Point Tracking - Rastreamento de Ponto de Potência Máxima
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature - Temperatura Normal da Célula Operacional
OCB	Organização das Cooperativas Brasileiras
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OPEX	Operational Expenditure - Despesas Operacionais
PASEP	Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público
PBF	Programa Bolsa Família

PIS	Programas de Integração Social
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
Seinfra	Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará
SFV	Sistema Fotovoltaico
SIN	Solução Ideal Negativa
SIP	Solução Ideal Positiva
STC	Standard Test Conditions - Condições de Teste Padrão
TE	Tarifa de Energia
TOPSIS	Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade com a Solução Ideal
TUSD	Tarifa do Uso do sistema de distribuição
TUSDg	Tarifa do Uso do sistema de distribuição - segmento geração
UGP	Unidade Gerenciadora de Projeto
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification - Convenção das Nações Unidas para Combater a Desertificação

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>cm</i>	Centímetro
<i>e</i>	Euro
<i>GW</i>	Gigawatt
<i>GW<sub>p</sub></i>	Gigawatt pico
<i>ha</i>	Hectare
<i>kW</i>	kilowatt
<i>kWh</i>	kilowatt-hora
<i>Kg</i>	Quilograma
<i>m</i>	Metros
<i>mm</i>	Milímetro
<i>MW</i>	Megawatt
<i>m<sup>2</sup></i>	Metro Quadrado
<i>km<sup>2</sup></i>	Quilômetro quadrado
<i>R\$</i>	Reais
<i>°C</i>	Grau Celsius
<i>U\$</i>	Dólar
<i>V</i>	Volts
<i>W<sub>p</sub></i>	Watt pico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	21
<b>2.1</b>	<b>Conceitos dos sistemas agrivoltaicos</b> .....	21
<b>2.2</b>	<b>Principais características dos sistemas agrivoltaicos</b> .....	22
<b>2.3</b>	<b>Tecnologias utilizadas nos sistemas agrivoltaicos</b> .....	22
<b>2.3.1</b>	<b>Módulo Fotovoltaico</b> .....	23
2.3.1.1	<i>Módulos Half-cell</i> .....	26
2.3.1.2	<i>Módulos bifaciais</i> .....	26
2.3.1.3	<i>Módulos semitransparentes</i> .....	27
2.3.1.4	<i>Módulos tubulares</i> .....	27
<b>2.3.2</b>	<b>O Inversor</b> .....	28
2.3.2.1	<i>Inversores de string</i> .....	28
2.3.2.2	<i>Microinversores</i> .....	29
<b>2.3.3</b>	<b>Rastreadores solares</b> .....	29
<b>2.4</b>	<b>Regulação aplicável aos empreendimentos de geração distribuída no Brasil</b> 30	
<b>2.4.1</b>	<b>Regulamentação da potência instalada dos empreendimentos de micro e minigeração distribuída</b> .....	31
<b>2.4.2</b>	<b>Sistema de compensação de créditos da geração distribuída</b> .....	31
<b>2.4.3</b>	<b>Modelos de exploração de micro e minigeração distribuída no Brasil</b> .....	33
<b>2.4.4</b>	<b>Categorias de geração compartilhada</b> .....	34
2.4.4.1	<i>Consórcio</i> .....	34
2.4.4.2	<i>Cooperativa</i> .....	34
2.4.4.3	<i>Associação</i> .....	35
<b>2.4.5</b>	<b>O mecanismo de compensação de créditos previsto na Lei n.º 14.300 – Norma de Transição</b> .....	35
<b>2.4.6</b>	<b>Aplicação da TUSDg</b> .....	36
<b>2.5</b>	<b>Exemplos de sistemas agrivoltaicos nos continentes</b> .....	37
<b>2.5.1</b>	<b>América do Norte</b> .....	38
<b>2.5.2</b>	<b>América do Sul</b> .....	38
<b>2.5.3</b>	<b>Europa</b> .....	39



2.5.4	<i>Ásia</i> .....	39
2.5.5	<i>África</i> .....	39
2.5.6	<i>Oceania</i> .....	40
2.6	<b>Benefícios dos sistemas agrivoltaicos para a geração de renda e recuperação de áreas degradadas</b> .....	40
2.7	<b>Custos associados a um sistema agrivoltaico</b> .....	41
2.8	<b>Produções agrícolas sinérgicas com sistemas agrivoltaicos</b> .....	42
2.8.1	<i>Resumo de fisiologia vegetal</i> .....	42
2.8.2	<i>Produção agrícola</i> .....	44
2.9	<b>Áreas suscetíveis à desertificação</b> .....	45
2.9.1	<i>Características</i> .....	45
2.9.2	<i>Localização</i> .....	47
2.9.3	<i>Metodologia de tratamento existente</i> .....	47
2.9.4	<i>Desertificação e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável</i> .....	50
3	<b>METODOLOGIA</b> .....	52
3.1	<b>Definição de premissas do sistema agrivoltaico</b> .....	52
3.1.1	<i>Escolha da cultura agrícola</i> .....	52
3.1.1.1	<i>Produção de agrícola</i> .....	53
3.1.2	<i>Escolha das áreas de implantação</i> .....	54
3.1.3	<i>Arranjo do sistema solar fotovoltaico</i> .....	59
3.1.3.1	<i>Definição da estrutura de suporte</i> .....	60
3.1.4	<i>Mecanismo de captação de água</i> .....	61
3.1.5	<i>Modelo de negócio</i> .....	62
3.1.5.1	<i>Unidade Gerenciadora de Projeto</i> .....	62
3.1.5.2	<i>Agência de crédito</i> .....	63
3.1.5.3	<i>Unidade Consumidora</i> .....	63
3.1.5.4	<i>Beneficiário</i> .....	64
3.1.5.5	<i>Visão Geral do programa</i> .....	64
3.2	<b>Simulação do sistema proposto</b> .....	68
3.2.1	<i>Sistema solar fotovoltaico</i> .....	70
3.2.2	<i>Estimativa de produção agrícola</i> .....	71
3.2.3	<i>Captação de água</i> .....	71

<b>3.2.4</b>	<b><i>Análise financeira</i></b> .....	72
3.2.4.1	<i>Parâmetros da usina</i> .....	74
3.2.4.2	<i>Fluxo de caixa</i> .....	74
3.2.4.3	<i>Receita familiar</i> .....	77
3.2.4.4	<i>Expansão do programa</i> .....	78
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	79
<b>4.1</b>	<b>Recomendações de trabalhos futuros</b> .....	80
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	82

## 1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica vem crescendo exponencialmente no mundo e, principalmente, no Brasil. Nos últimos anos a fonte vem crescendo cerca de 86% ao ano e a previsão é que em 2050 chegue-se ao patamar de 250 GW instalado na matriz energética brasileira (NEF, 2021).

Com a disseminação da tecnologia, os custos nivelados por Megawatt (MW) vêm reduzindo ao longo dos anos, facilitando, assim, a propagação da tecnologia em locais com baixo poder aquisitivo. É importante ressaltar que uma maior oferta de financiamentos facilitou o acesso a essa tecnologia para diversos setores e classes da sociedade.

Os setores agrícola e pecuarista vêm investindo em geração de energia elétrica por fontes alternativas, principalmente a solar, visando à redução de custos com energia elétrica causadas pela industrialização do campo e uso de equipamentos eletroeletrônicos.

O Estado do Ceará, o quarto maior em potência instalada de usinas solares fotovoltaicas centralizadas (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2023), é conhecido por apresentar altas temperaturas e uma incidência de radiação solar intensa durante todo o ano. Essas características climáticas têm impactos significativos na agricultura, no solo e nos sistemas fotovoltaicos da região.

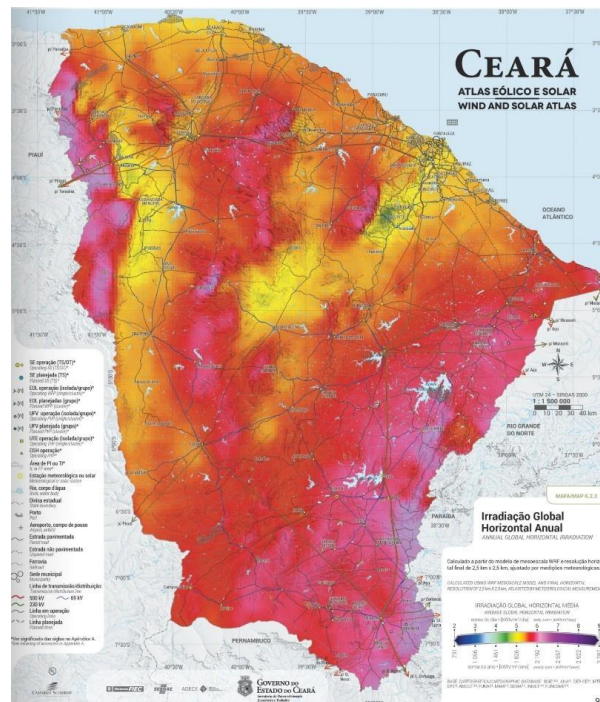
Além disso, o Ceará é um importante ator nacional na pecuária e na agricultura, sendo relevante na caprinocultura, plantação de feijão, algodão, batata-doce e tomate. Esses cultivos e criações necessitam de maquinários elétricos para a sua manutenção e bom crescimento, logo a energia elétrica se mostra um insumo importante para o setor (IBGE, 2008).

A alta incidência de sol, Figura 1, no Ceará, é uma vantagem para a produção de energia elétrica a partir da energia solar. O índice de irradiação solar médio no Ceará é de aproximadamente 6,5 kWh/m<sup>2</sup>, um dos maiores do país (Silva *et al.*, 2010). Porém, a temperatura elevada na região pode afetar a eficiência dos painéis solares, reduzindo a produção de energia elétrica (Mahmood *et al.*, 2020).

Além da alta temperatura e alto índice de irradiação solar, o índice pluviométrico do Ceará apresenta variações significativas ao longo do ano, com uma estação seca prolongada e uma estação chuvosa concentrada em alguns meses. De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o índice pluviométrico médio do Ceará é de cerca de 800 mm por ano, com variações entre as diferentes regiões do Estado (Rodrigues *et al.*, 2021).

Assim, graças a essas características naturais do estado, variações climáticas e

Figura 1 – Irradiação Global Horizontal Anual



Fonte: Fonte: (ASSOCIADOS *et al.*, 2019)

atividades humanas, o Ceará apresenta 100% do seu território suscetível à degradação e 11,45% já desertificado. As áreas mais suscetíveis à degradação são as localizadas no Sertão dos Inhamuns, Sertão Central e Vale do Jaguaribe (FUNCEME, 2022). Essas áreas apresentam terrenos pobres em nutrientes e água, tornando-as, assim, áreas improdutivas e sem uma utilização até então. Assim, nota-se que as Áreas suscetíveis a desertificação (ASD) limitam a capacidade produtiva da agricultura e pecuária estadual (Costa, 2020).

Corroborando com as afirmações supra, o Instituto de Pesquisa do Ceará (IPECE), em 2009, por meio da Nota Técnica nº41, identificou uma correlação negativa entre o desenvolvimento dos municípios cearenses e o processo de desertificação das áreas dos municípios. Assim, essa relação de reciprocidade negativa deve ser quebrada por políticas públicas e iniciativas privadas para que não se perpetue, agravando ainda mais o processo de desertificação e dificultando cada vez mais a difícil trajetória em direção ao desenvolvimento sustentável.

As principais atividades econômicas nessas regiões são a agricultura e a pecuária, que, por sua vez, são as principais causas da degradação. A falta de práticas sustentáveis de uso da terra, como a irrigação adequada, a rotação de culturas e o uso de técnicas de conservação do solo, levam à degradação do solo e à diminuição da capacidade produtiva da área cultivável (FUNCEME, 2022).

A alta incidência solar dessas regiões é benéfica para o crescimento das plantas,

desde que haja manejo adequado. A radiação solar é um fator essencial para a realização da fotossíntese, processo pelo qual as plantas produzem sua própria energia. Porém, o estresse térmico nas plantas pode afetar a fotossíntese, a absorção de nutrientes e a produção de frutos, prejudicando a qualidade e a quantidade da produção agrícola (Taiz *et al.*, 1998).

Para minimizar os impactos negativos da alta incidência de sol na agricultura e no solo, é necessário adotar técnicas de manejo adequadas, como o uso de técnicas de irrigação eficientes, uso do sombreamento e a escolha de culturas mais resistentes ao clima da região (Hopkins *et al.*, 1995).

A área cultivável do Ceará é limitada e está suscetível à degradação. Assim, sabendo que até 2050 o mundo deverá dobrar a capacidade produtiva da agricultura para atender a necessidade de cerca de 9,7 bilhões de pessoas no ano de 2050 (FAO, 2010), faz-se imperioso a recuperação de áreas degradadas e a conservação de áreas suscetíveis a degradação.

Além das dificuldades ambientais, o Ceará enfrenta problemas sociais. Um ponto sensível e relevante é a população que vive em situação de extrema pobreza. Em 2022, mais de 3,4 milhões (mais de um terço da população total) de cearenses viveram em situação de extrema pobreza. É importante ressaltar que a maioria dessas pessoas se concentram em áreas rurais e semiáridas, como o Sertão Central e o Sertão dos Inhamuns (IPECE, 2013).

A extrema pobreza e pobreza são condições nas quais as pessoas não têm acesso aos recursos mínimos necessários para satisfazer suas necessidades básicas, como alimentação, saúde, moradia e educação. Essa situação é caracterizada por altos níveis de privação e vulnerabilidade social, e podem afetar negativamente o bem-estar e o desenvolvimento humano das pessoas (IPECE, 2013).

Em sua definição mais recente, o Banco Mundial estabeleceu um critério para medir o índice de pobreza em nível global. Conforme tal critério, indivíduos cuja renda per capita é igual ou inferior a U\$ 2,15 diários são classificados como extremamente pobres (CIVIL, 2022). Já para classificar a pobreza, a renda per capita/dia é de U\$ 6,85. Os valores foram passados pela conversão utilizando a Paridade de Poder de Compra (PPC/2017), uma abordagem alternativa à taxa de câmbio. Essa metodologia leva em consideração a quantidade de recursos necessária para adquirir a mesma quantidade de bens e serviços no mercado interno de cada país, comparativamente ao mercado norte-americano. Deste modo, foram estabelecidos os limites das linhas de pobreza e extrema pobreza, considerando valores de R\$ 665,02 e R\$ 208,73 por mês para o ano de 2022.

Segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) , elaborado em 2022, das 27 Unidades da Federação (UFs) brasileiras, nove delas têm a maior parte da população composta por pessoas em situação de pobreza, a saber, Maranhão (58,9%), Amazonas (56,7%), Alagoas (56,2%), Paraíba (54,6%), Ceará (53,4%), Pernambuco (53,2%), Acre (52,9%), Bahia (51,6%) e Piauí (50,4%). O Ceará como o 5ª estado do Brasil e o terceiro do Nordeste com maior parcela da população em situação de pobreza (IBGE, 2015).

Logo, mostra-se necessário a recuperação de áreas suscetíveis a desertificação, bem como a geração de renda para pessoas em situação de pobreza extrema e pobreza no Ceará. Dessa maneira, o uso do sistema agrivoltaicos se mostra como uma solução para sanar esses problemas endêmicos.

Este trabalho tem como objetivo principal estudar o uso de sistemas agrivoltaicos para geração de renda e recuperação de áreas suscetíveis a desertificação.

Como objetivos específicos tem-se:

- Dimensionar um sistema agrivoltaico modelo para o Ceará;
- Determinar um cultivo que possibilite a produção de alimento em sinergia com o sistema agrivoltaico;
- Estabelecer um modelo de negócio que seja viável para gerar renda para a pessoas em situação de pobreza; e
- Verificar a viabilidade técnica, financeira e regulatória do projeto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O uso de energia renovável é cada vez mais importante para atender às necessidades energéticas da população mundial e minimizar os impactos ambientais. A energia solar é uma fonte de energia renovável, que pode ser convertida em eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos. Os sistemas agrivoltaicos surgem como uma alternativa para aumentar a eficiência no uso de terra, água e gerar energia elétrica em áreas rurais. Neste capítulo, serão apresentados os conceitos básicos dos sistemas agrivoltaicos e suas principais características, as tecnologias utilizadas, exemplos em diferentes países e os benefícios dos sistemas agrivoltaicos para geração de renda e recuperação de áreas suscetíveis a desertificação.

### 2.1 Conceitos dos sistemas agrivoltaicos

O sistema agrivoltaico, também conhecida como agrofotovoltaica, consiste em utilizar a mesma área de terra para obter energia solar e produtos agrícolas, fazendo com que seja possível a coexistência de painéis solares com as culturas na mesma superfície. Esta técnica foi originalmente concebida por Adolf Goetzberger e Armin Zastrow em 1981, mas o conceito não se tornou popular até a década passada (Mamun *et al.*, 2022a).

A sombra dos painéis lançados nas lavouras pode afetar sua produtividade, pois recebem um pouco menos de luz, isso beneficia algumas culturas (Sarr *et al.*, 2023). O uso de energia solar em áreas agrícolas também estimula o autoconsumo local, uma vez que as necessidades energéticas das fazendas podem ser facilmente atendidas, instantaneamente, com a eletricidade gerada, haja vista que há concorrência entre as atividades executadas no meio rural e a geração de energia fotovoltaica.

Os sistemas de suporte fixo são usados para elevar os painéis solares cinco metros acima do campo de cultivo. Isso permite o acesso de máquinas agrícolas às culturas abaixo. Os painéis solares também podem ser instalados em telhados de estufas. Outras instalações dispõem de sistemas de monitoramento, que permitem orientar os painéis para maximizar a sua eficiência e evitar que façam sombra sempre no mesmo local, adaptando-se assim às necessidades das plantas. Esses sistemas exigem modelos de *software* complexos que consideram aspectos como fases de crescimento das culturas, o clima e a movimentação da terra em relação ao Sol (Sarr *et al.*, 2023).

Benefícios sociais significativos das fazendas agrivoltaicas surgem de novos empre-

gos, renda da comunidade e potenciais receitas fiscais. Todos esses fatores se combinam para reduzir a migração da comunidade rural para as áreas urbanas (Mamun *et al.*, 2022b).

## 2.2 Principais características dos sistemas agrivoltaicos

Os sistemas agrivoltaicos apresentam características específicas que devem ser observadas, tais como:

- Escolha da cultura agrícola que melhor se adapta às condições locais e que não prejudica a eficiência da geração de energia elétrica;
- Seleção dos painéis solares com base na eficiência, durabilidade e resistência a condições climáticas adversas, observando parâmetros como Nominal Operating Cell Temperature - Temperatura Normal da Célula Operacional (NOCT) e Standard Test Conditions - Condições de Teste Padrão (STC);
- Dimensionamento do sistema para atender à demanda de energia elétrica, considerando as variações sazonais de radiação solar;
- Escolha do tipo de estrutura de suporte dos painéis solares, considerando a resistência ao vento, ao peso dos painéis, uso de máquinas agrícolas sob os painéis e à manutenção, bem como a necessidade de instalação de rastreador solar;
- Instalação dos painéis solares com espaçamento adequado para permitir a passagem de luz e a circulação de ar entre as plantas, evitando a sombra excessiva e a redução da produtividade das culturas agrícolas; e
- Manutenção regular dos painéis solares e das culturas agrícolas para garantir o bom funcionamento e a produtividade do sistema (Sarr *et al.*, 2023).

## 2.3 Tecnologias utilizadas nos sistemas agrivoltaicos

Os sistemas agrivoltaicos utilizam diferentes tipos de tecnologias, como módulos bifaciais, tubulares, semitransparentes, microinversores, inversores de *string* e rastreadores solares. Cada uma dessas tecnologias tem sua aplicação específica e pode ser combinada para obter a máxima eficiência na produção de energia elétrica e alimentos. Nesta seção, serão descritas cada uma dessas tecnologias, seus princípios de funcionamento e suas aplicações em sistemas agrivoltaicos.



### 2.3.1 Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é uma unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, para gerar energia elétrica (Pinho, 2014).

Com um módulo posicionado na direção do Sol, pode ser medida uma tensão entre os terminais com um voltímetro. A tensão observada em um módulo desconectado é a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ). Por outro lado, ao conectar os terminais desse módulo a um amperímetro, mede-se sua corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ). Entretanto, estes dados são pouco informativos sobre a potência real do módulo (Pinho, 2014).

Um módulo é identificado pela sua potência elétrica de pico (Wp). A definição da potência de pico de um módulo fotovoltaico é feita em STC, considerando irradiância solar de 1000 W/m<sup>2</sup> sob uma distribuição espectral padrão para AM 1,5 e temperatura de célula de 25 °C (Preiser, 2016).

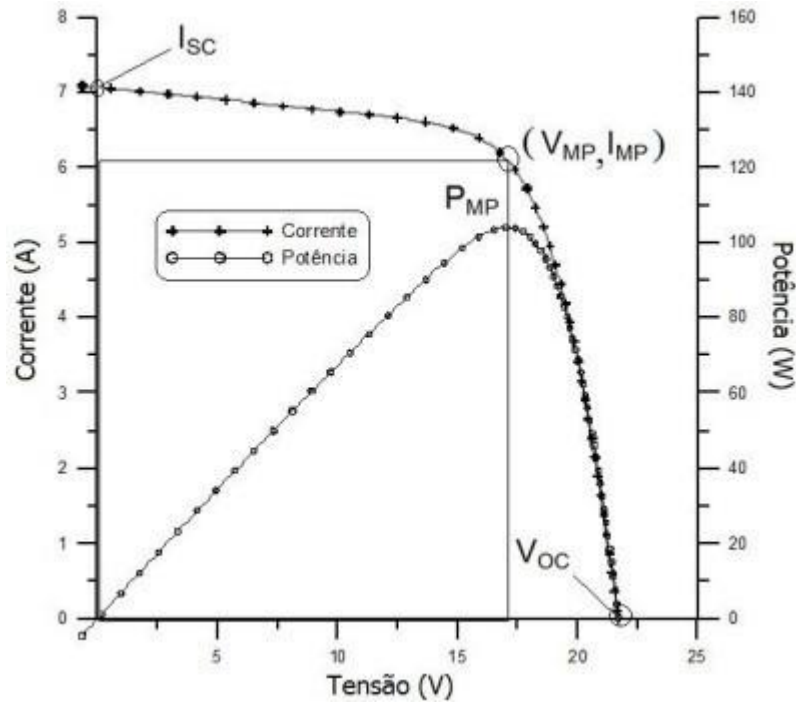
Para determinar as características elétricas de um módulo fotovoltaico é feito um ensaio para traçar de sua curva característica corrente-tensão (I-V). Nesse teste o módulo é submetido às condições-padrão de ensaio e uma fonte de tensão variável realiza uma varredura entre uma tensão negativa de poucos volts (em relação aos terminais do módulo) até ultrapassar a tensão de circuito aberto do módulo (quando sua corrente fica negativa) (Preiser, 2003). Nesse procedimento são registrados pares de dados de tensão e corrente, permitindo traçar uma curva característica como a apresentada na Figura 2.

A eficiência ( $\eta$ ) dos módulos é obtida por meio da relação entre a irradiância solar e a potência elétrica máxima gerada. Quando este número é determinado nas condições-padrão de ensaio, a irradiância é de  $G = 1.000 \text{ W/m}^2$  e a potência luminosa incidente no módulo pode ser calculada pelo produto deste valor pela área do módulo (AM). A Equação 2.1 apresenta o cálculo da eficiência do módulo (Pinho, 2014).

$$\eta = \frac{P_{nominal}}{G \times AM} \times 100[\%] \quad (2.1)$$

A eficiência dos painéis solares é diretamente proporcional à quantidade de irradiação solar que incide sobre eles. Portanto, quanto maior a irradiação solar, maior será a quantidade de eletricidade que será gerada pelos painéis solares. Além disso, a eficiência dos painéis solares

Figura 2 – Curva característica I-V e curva de potência-tensão (P-V) para um módulo com potência nominal de 100Wp

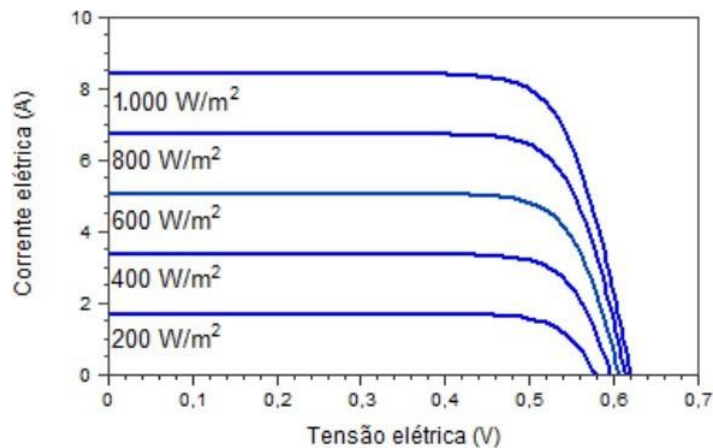


Fonte: (Pinho, 2014)

diminui quando as células solares são expostas a altas temperaturas, o que geralmente ocorre quando a irradiação solar é muito alta.

A Figura 3 mostra como a irradiância solar incidente afeta a curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício, mantida na temperatura de 25 °C.

Figura 3 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25 °C

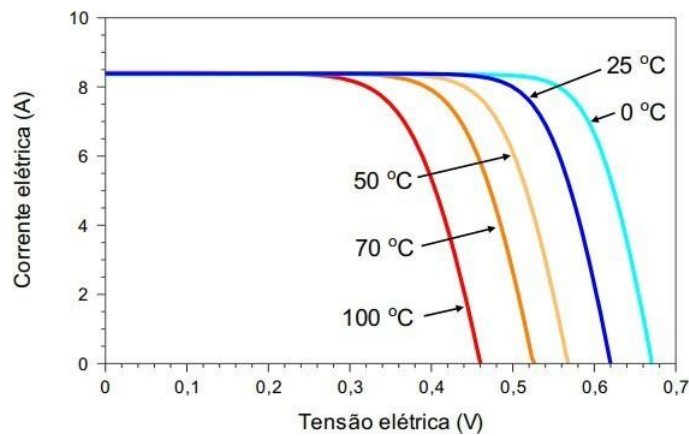


Fonte: (Pinho, 2014)

A variação da temperatura ambiente afeta a operação das células fotovoltaicas que

compõem os módulos fotovoltaicos. A Figura 4 apresenta curvas I-V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica, com irradiância de  $1.000 \text{ W/m}^2$  (Preiser, 2003). O aumento da temperatura ambiente produz um aumento da temperatura da célula e, conseqüentemente, reduz a sua eficiência.

Figura 4 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (para irradiância de  $1.000 \text{ W/m}^2$ , espectro AM 1,5).



Fonte: (Pinho, 2014)

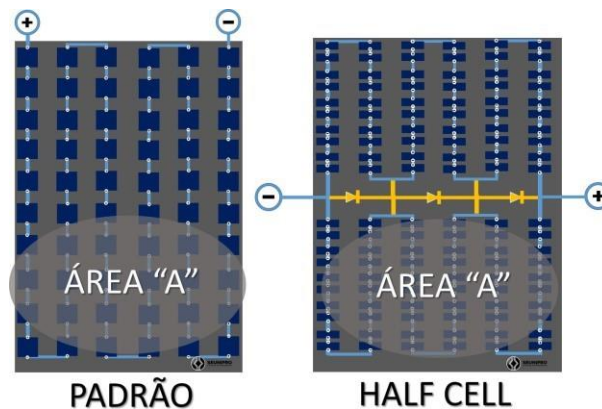
Isto se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto sua corrente sofre uma elevação muito pequena. Em uma célula de silício cristalino, um aumento de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  na temperatura produz uma variação da ordem de  $-0,2 \text{ V}$  ( $-30\%$ ) em  $V_{oc}$  e de  $+0,2\%$  em  $I_{sc}$  (Pinho, 2014).

A temperatura do módulo fotovoltaico tem um efeito significativo na saída de energia de um sistema de energia fotovoltaica porque determina a potência máxima de saída (Bae, 2020). Parâmetros atmosféricos, como temperatura ambiente, irradiância e velocidade do vento, variam conforme as condições de instalação (Muller *et al.*, 2012). Devido a esses fatores ambientais, é comum usar o NOCT conforme a IEC 61215:2005 (Commission *et al.*, 2005) como um indicador da temperatura de operação do módulo. A maioria dos fabricantes de módulos fotovoltaicos inclui o seguinte: a STC, que são irradiância de  $1.000 \text{ W/m}^2$ , temperatura ambiente de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e características de saída em massa de ar de AM 1,5 G e NOCT com irradiância de  $800 \text{ W/m}^2$ , temperatura ambiente de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  e característica de saída em massa de ar de AM 1,5 G nas folhas de dados do módulo.

### 2.3.1.1 Módulos *Half-cell*

Os módulos solares convencionais consistem em células solares conectadas em série na forma de *string* e cada *string* é protegida por um diodo de *bypass*, conforme apresentado na Figura 5. As condições de sombreamento parcial limitam a corrente gerada na cadeia relevante no ponto de potência máxima à corrente da célula solar sombreada (Hanifi *et al.*, 2015). Em correntes mais altas, a célula sombreada pode se tornar polarizada inversamente e consumir a energia gerada pelas células não sombreadas. Como resultado, a célula sombreada pode formar pontos quentes, resultando em forte aquecimento desta célula (Molenbroek *et al.*, 1991).

Figura 5 – Diferença entre um módulo comum e um *half-cell*



Fonte: (Eduardo, 2021)

Módulos *half-cell* são importantes em sistemas agrivoltaicos, pois como o sistema está inserido em um ambiente normalmente mais rústico, podem haver sombreamento de vegetações existentes com altura superior a dos módulos solares. Assim, visando a manutenção da geração e o bom funcionamento do sistema, os módulos construídos com a tecnologia *half-cell* se mostram essenciais em sistemas agrivoltaicos.

### 2.3.1.2 Módulos bifaciais

Os módulos bifaciais são uma tecnologia que permite a captação de radiação solar por ambas as faces do painel solar, aumentando a eficiência da geração de energia elétrica em sistemas agrivoltaicos. Esses módulos possuem células fotovoltaicas em ambos os lados, permitindo a captação da radiação solar refletida pelo solo ou pelas plantas (Zhang *et al.*, 2022).

Alguns estudos mostram que o uso de módulos bifaciais em sistemas agrivoltaicos

pode aumentar a produção de energia elétrica em até 25%, dependendo das condições de luminosidade e do tipo de cultura agrícola (Zhang *et al.*, 2022). Além disso, a utilização de módulos bifaciais pode reduzir a sombra sobre as plantas e aumentar a produtividade das culturas agrícolas em até 30%, já que há um nível maior de permissividade da luz solar, comparado com o uso de módulos unifaciais (Zhang *et al.*, 2022).

#### 2.3.1.3 *Módulos semitransparentes*

Os módulos solares semitransparentes são outra tecnologia que pode ser usada em sistemas agrivoltaicos. Esses módulos têm a capacidade de permitir que a luz solar passe, parcialmente, através deles, permitindo, assim, a luz solar necessária para o crescimento das plantas. Em contrapartida, esses equipamentos têm uma menor eficiência, se comparado com as demais tecnologias (Sarr *et al.*, 2023).

Esses módulos podem ser utilizados em combinação com outros tipos de módulos solares, como os módulos bifaciais, para maximizar a produção de energia elétrica e permitir o cultivo de plantas agrícolas abaixo dos painéis solares. A combinação dessas tecnologias pode aumentar significativamente a eficiência e a produtividade dos sistemas agrivoltaicos.

#### 2.3.1.4 *Módulos tubulares*

A tecnologia de módulos tubulares é uma inovação bastante sinérgica com o campo da agrivoltaica. Os tubos solares são estruturas cilíndricas de vidro que capturam a luz do sol de todos os ângulos, permitindo que a luz solar seja utilizada mais eficientemente do que em painéis solares tradicionais, haja vista que os raios solares estão sempre perpendiculares aos módulos.

Essa tecnologia é particularmente útil em sistemas agrícolas, pois a sombra dos tubos solares pode ser usada para proteger as culturas sensíveis à luz do sol direto. Além disso, a sombra também pode ajudar a reduzir a evapotranspiração, mantendo o solo mais úmido e protegendo as plantas de altas temperaturas.

O uso de tubos solares na agrivoltaica também pode melhorar a eficiência da produção de energia solar, pois a sombra que eles criam sobre a plantação ajuda a resfriar a superfície da terra, reduzindo a temperatura ambiente ao redor dos painéis solares (AG, 2021).

### 2.3.2 O Inversor

Módulos solares fotovoltaicos geram energia em corrente contínua. Assim, faz-se necessário o uso de um conversor CC/CA, ou inversor, para que se obtenha tensão em corrente alternada com as características (frequência, conteúdo de harmônicos, forma de onda, etc.) necessárias para satisfazer as condições impostas pela rede elétrica pública e possibilitar assim a interconexão à rede (Preiser, 2003).

Os inversores comumente utilizados podem ser de dois tipos:

- Comutados pela própria rede elétrica, onde o sinal da rede é utilizado para sincronizar o inversor com a rede, ou
- Auto-comutados, onde um circuito eletrônico no inversor controla e sincroniza o sinal do inversor ao sinal da rede (Rüther, 2004).

Além disso, existem no mercado inversores *string*, microinversores e inversores centrais. A diferença entre eles é basicamente a potência nominal: os microinversores atendem uma faixa de potência de 1 kW a 3,6 kW, já os inversores de *string* atendem até 250 kW e os inversores centrais atendem uma potência superior aos inversores *string*. Existem vantagens e aplicações específicas ideais para cada tipo de inversor.

#### 2.3.2.1 Inversores de *string*

Os inversores de *string* são um componente essencial dos sistemas fotovoltaicos, convertendo a corrente contínua produzida pelos módulos solares em corrente alternada que pode ser usada na rede elétrica ou consumida diretamente pelo usuário (Mamun *et al.*, 2022b). Esses inversores têm sido amplamente utilizados em sistemas agrivoltaicos devido à sua eficiência, confiabilidade e facilidade de manutenção.

Os inversores de *string* têm a capacidade de monitorar o desempenho dos módulos conectados, permitindo que os proprietários ou operadores do sistema identifiquem rapidamente qualquer problema que possa afetar a eficiência ou a produção do sistema. Além disso, os inversores de *string* permitem a conexão de um grande número de módulos solares em série, o que simplifica a instalação e reduz os custos associados.

### 2.3.2.2 *Microinversores*

Esses dispositivos podem ser instalados individualmente em cada painel solar, permitindo o controle e monitoramento da geração de energia elétrica de cada painel de forma independente (Zhang *et al.*, 2022). O microinversor é diminuto e pode ser instalado atrás do painel solar, dispensando necessidades com obras de infraestrutura para abrigar o inversor. Ele é projetado com Module-Level Power Electronics - Eletrônica de Potência em Nível de Módulo (MLPE), que consiste na otimização da geração de energia individualmente por módulo, por isso se recomenda o uso de microinversores quando há sombreamento, diferentes faces de um telhado ou qualquer fator que possa ocasionar uma diferença de produção entre os painéis solares.

Com relação à geração de energia, em um sistema sem sombreamentos ou faces múltiplas, a produção dos microinversores e inversores *string* será muito similar. Enquanto o Maximum Power Point Tracking - Rastreamento de Ponto de Potência Máxima (MPPT) individual dos micros garante uma melhor otimização, a eficiência de conversão do inversor *string* pode ser ligeiramente maior. Outro fator importante é a possibilidade de expansão do sistema. Com o microinversor, devido a sua característica modular, é facilitada a inserção de mais conjuntos de módulos e inversores. Por outro lado, com o inversor *string* é necessário trocar o equipamento por uma potência maior.

Já do ponto de vista da segurança, é possível detectar que enquanto o microinversor opera em baixas tensões de entrada, cerca de 60 Volts, o inversor *string* necessita de altas tensões (até 1500 Volts), o que pode envolver riscos de acidentes e aumentar a possibilidade de choques elétricos ou até incêndios.

A utilização de microinversores em sistemas agrivoltaicos apresenta vantagens em relação aos inversores centrais convencionais, como a maior eficiência na conversão de energia elétrica, a redução de perdas devido à sombra ou sujeira em um painel solar, e a detecção rápida de falhas em um painel solar (Mamun *et al.*, 2022b).

### 2.3.3 *Rastreadores solares*

Os rastreadores solares, mais conhecido como *trackers*, são uma tecnologia que permite que os módulos solares acompanhem a trajetória do sol durante o dia, maximizando a quantidade de luz solar capturada pelos painéis solares. Os *trackers* solares podem aumentar a produção de energia elétrica dos sistemas agrivoltaicos em até 40% em comparação com sistemas

fixos (Ramful *et al.*, 2022).

Existem vários tipos de *trackers* solares disponíveis no mercado, incluindo *trackers* de eixo único e *trackers* de dois eixos. Os *trackers* de eixo único movem os módulos solares de leste a oeste, seguindo a trajetória do sol durante o dia. Os *trackers* de dois eixos, mais aplicado em localidades dsitantes da linha do equador, por outro lado, também movem os módulos solares de norte a sul, permitindo que eles sigam a trajetória do sol durante todo o dia e durante todo o ano.

#### **2.4 Regulação aplicável aos empreendimentos de geração distribuída no Brasil**

No ano de 2012, o Poder Executivo federal ratificou a Resolução Normativa nº 482, estabelecendo, assim, o arcabouço para o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Mediante o SCEE, os consumidores que se dedicam à geração de energia solar podem injetar o excedente na rede elétrica e auferir créditos com vistas a amortizar o consumo em períodos de produção insuficiente.

A instituição do SCEE exerceu um ímpeto notável no avanço da geração distribuída no solo brasileiro. A cifra de sistemas fotovoltaicos instalados era escassa, totalizando apenas 20 mil em 2012; todavia, essa cifra conheceu um salto exponencial, alcançando mais de 1 milhão de sistemas em 2022.

A presente conjuntura se vê permeada por dispositivos regulamentares que delimitam o escopo da geração distribuída no Brasil:

- A Lei nº 14.300, datada de 06 de janeiro de 2022, enunciando o Marco legal da microgeração e minigeração distribuída;
- A Resolução Normativa nº 1.000/21 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), disciplinadora das normas que balizam a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica;
- A Resolução Normativa nº 1.059/23 da ANEEL, promovendo o refinamento das diretrizes concernentes à conexão e tarifação de centrais de microgeração e minigeração distribuída no seio dos sistemas de distribuição de energia elétrica, além de reverberar sobre as regulamentações do Sistema de Compensação de Energia Elétrica; e
- O Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição, uma diretriz normativa reguladora das condições inerentes ao acesso à rede de distribuição, consoante a Resolução Normativa nº 956/2021 da ANEEL;



A Lei 14.300/2022 erigiu o paradigma legal da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), assegurando, ao mesmo tempo, sua operacionalização por meio do SCEE. Este marco legal almejou salvaguardar a estabilidade jurídica e regulatória dos empreendimentos vinculados à MMGD, notadamente diante da reavaliação da regulamentação prévia, que gerou incertezas no setor quanto à permanência ou não dos privilégios outrora instituídos.

#### ***2.4.1 Regulamentação da potência instalada dos empreendimentos de micro e minigeração distribuída***

A regulamentação referente à capacidade instalada dos empreendimentos de MMGD encontra sua fundamentação na Lei nº 14.300 e na Resolução Normativa nº 1.000/21. O modelo adotado para a MMGD engloba centrais geradoras cuja capacidade de produção se situa até 5 MW, originando energia por meio de fontes renováveis ou de cogeração qualificada. Com maior detalhamento: a categoria de Microgeração Distribuída abarca empreendimentos com potência instalada de até 75 kW; no que tange à Minigeração Distribuída, esta contempla empreendimentos cuja potência instalada ultrapasse 75 kW, porém se situe igual ou abaixo de 5 MW, no caso das centrais geradoras de fontes despacháveis, e 3 MW para as demais fontes que não se enquadrarem como centrais geradoras de fontes despacháveis.

Assim, é pertinente notar que, embora a Lei nº 14.300/22 não proíba que um único consumidor mantenha a posse de múltiplos sistemas de minigeração distribuída, impende observar que a limitação não se relaciona à titularidade das centrais, seja através do Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica (CNPJ). Contudo, as centrais assim designadas não podem transpor o limiar de 3 MW em uma mesma localidade. Tal preceito implica que as centrais devem ser dispostas em locais diversos.

#### ***2.4.2 Sistema de compensação de créditos da geração distribuída***

O Sistema de Compensação de Energia Elétrica opera por meio da injeção de energia elétrica ativa nas redes de distribuição por parte das centrais de geração distribuída, concebendo, assim, o empréstimo da energia à distribuidora. A distribuidora registra a quantidade de energia injetada na forma de créditos de energia elétrica, posteriormente utilizados para compensar o consumo das unidades consumidoras registradas como beneficiárias do SCEE.

A faturação das unidades consumidoras inseridas no SCEE, conforme o artigo 655-G da Resolução Normativa nº 1.000/2021, consiste na consideração da energia injetada na rede, do

consumo efetuado e, ademais, dos eventuais créditos acumulados anteriormente. Os créditos gerados e não empregados são acumulados pela distribuidora e podem ser aproveitados pelo consumidor em um período de até 60 (sessenta) meses, conforme disposições do artigo 13 da Lei nº 14.300 e do artigo 655-L da Resolução Normativa ANEEL 1.000/21. A compensação segue a estrutura de postos tarifários, atendendo às orientações do parágrafo 3º do artigo 655-G, considerando a discrepância nos valores entre os horários de pico e os de demanda reduzida.

Conquanto, para as unidades consumidoras do Grupo B, o faturamento dos custos remanescentes é determinado através da avaliação da opção mais onerosa para a unidade consumidora: a liquidação do custo de disponibilidade, a quitação gradual da parcela Tarifa do Uso do sistema de distribuição (TUSD) Fio B, de acordo com o cronograma apresentado pela Lei nº 14.300, ou o pagamento integral de outros encargos contemplados pelo Marco Legal da Geração Distribuída. Esse último cenário é aplicável apenas a certos modelos de negócios. O custo de disponibilidade, conforme o artigo 291 da Resolução Normativa ANEEL 1.000/2021, varia conforme o sistema elétrico instalado:

Artigo 291. O custo de disponibilidade do sistema elétrico é o valor em moeda corrente equivalente a:

I - 30 kWh, para sistemas monofásicos ou bifásicos com 2 (dois) condutores;

II - 50 kWh, para sistemas bifásicos com 3 (três) condutores;

III - 100 kWh, para sistemas trifásicos.

Em contrapartida, as unidades consumidoras do Grupo A, as quais se encontram conectadas em média ou alta tensão, são submetidas, no mínimo, ao faturamento de acordo com sua demanda contratada, expressa em kilowatt (kW). O custo de disponibilidade e a demanda contratada têm como intuito garantir a remuneração da distribuidora pelo uso de sua infraestrutura elétrica.

No contexto em que a geração se processa em locais remotos da carga, como o autoconsumo remoto ou a geração compartilhada, a alocação dos créditos gerados a partir do excedente de energia pode ser concretizada entre distintas unidades consumidoras, contanto que se observe a relação de titularidade entre o sistema de micro ou minigeração e a unidade consumidora beneficiária.

Uma vez satisfeitas as condições de aptidão das unidades consumidoras para participar do SCEE – critérios estes que variam conforme o modelo de exploração da micro ou minigeração – basta a submissão à distribuidora local da relação de unidades consumidoras que

serão contempladas pelos créditos de energia elétrica gerados, bem como a proporção de partilha a elas destinada. No caso da geração compartilhada, é comum estabelecer percentuais de distribuição dos créditos de energia consoante os custos associados à manutenção da infraestrutura utilizada, abarcando o consumo de energia elétrica pela respectiva unidade consumidora.

Esta lista das unidades consumidoras beneficiadas pelos créditos de energia pode ser modificada pelo próprio titular da unidade consumidora em consonância com a central geradora, estando a distribuidora obrigada a responder no prazo de 30 (trinta) dias, nos termos do artigo 12, parágrafo 4º da Lei nº 14.300/2022.

### ***2.4.3 Modelos de exploração de micro e minigeração distribuída no Brasil***

Diversos modelos de exploração caracterizam a micro e minigeração distribuída no Brasil, compreendendo quatro abordagens preponderantes: Geração Junto à Carga, Autoconsumo Remoto, Geração Compartilhada e Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras.

No paradigma de Geração Junto à Carga, a central geradora é implantada no mesmo edifício onde ocorrerá o consumo. Nesse arranjo, a unidade consumidora com a central de geração coincide com a unidade consumidora beneficiária da energia gerada. Dessa forma, estabelece-se uma correlação entre o titular do projeto e da unidade consumidora, seja por meio do CPF ou do CNPJ.

O modelo de Autoconsumo Remoto, por sua vez, aloca a central geradora em local distinto do local de consumo, permitindo que o excedente de energia gerado pela unidade consumidora portadora da central de geração seja ressarcido por outra unidade consumidora, da mesma titularidade, mas situada em área geograficamente separada. É imperativo salientar que as unidades consumidoras (geradora e consumidora) devem compartilhar a mesma área de concessão da distribuidora e manter a correspondência de titularidade (CPF/CNPJ - matriz e filial) entre a central de micro ou minigeração e as unidades consumidoras favorecidas pelo SCEE.

O conceito de Empreendimentos com Múltiplas Unidades Consumidoras compreende a proximidade física de consumidores em áreas contíguas, cada qual com suas centrais de geração, compartilhando instalações de uso comum para a conexão à rede de distribuição. Nesse cenário, a formação de um condomínio ou entidade única é essencial. É de salientar que a legislação expressamente proíbe o uso de vias públicas, passagens aéreas ou subterrâneas, bem como propriedades de terceiros. Portanto, é necessário que o terreno dos consumidores

interessados seja contínuo, vedando a geração remota nesse contexto.

O modelo de Geração Compartilhada caracteriza-se pela congregação de consumidores de um mesmo estado para gerar energia para uso coletivo. Esses consumidores se agrupam por meio de consórcios, cooperativas, associações, condomínios edilícios ou condomínios voluntários. Tais mecanismos permitem a produção de energia em nome do veículo de exploração e a distribuição dos créditos de energia gerados entre seus participantes. Nesse cenário, diferentes titulares, seja por CPF ou CNPJ, podem usufruir do SCEE, conforme a abordagem escolhida.

#### ***2.4.4 Categorias de geração compartilhada***

Nesse contexto, as delimitações das categorias de geração compartilhada, propiciadas pela Lei n.º 14.300/2022 e normatizadas pela Resolução Normativa ANEEL n.º 1.059/2023, adquirem um valor inestimável.

##### ***2.4.4.1 Consórcio***

A Resolução n.º 1.059/23 da ANEEL inaugurou um conceito peculiar de consórcio de consumidores de energia elétrica. Através dessa resolução, o consórcio passa a ser aberto tanto a pessoas jurídicas quanto a indivíduos físicos.

Este modelo singular de consórcio se distingue do consórcio de sociedades por um elemento crucial: enquanto o consórcio de sociedades é constituído por empresas, o consórcio de consumidores de energia elétrica pode ser composto por entidades físicas e jurídicas, contanto que sejam consumidores, para o propósito específico de geração compartilhada de energia.

##### ***2.4.4.2 Cooperativa***

A constituição de uma Cooperativa demanda, no mínimo, a participação de 20 indivíduos físicos, para posterior inclusão de entidades jurídicas. Esse paradigma é regulamentado pela Lei n.º 5.764/71 (Lei das Cooperativas).

Trata-se de uma entidade sem fins lucrativos, formada por deliberação registrada em Ata de Assembleia Geral de Constituição ou por Instrumento Público de Constituição. Conforme a Lei das Cooperativas, a cooperativa deve ser registrada na Junta Comercial. A inclusão de membros se dá mediante um termo de adesão, enquanto a desvinculação do cooperado pode ocorrer via eliminação, exclusão ou demissão.

A cooperativa deve ser devidamente registrada na Organização das Cooperativas Brasileiras (OCB) de seu estado, aderindo aos princípios cooperativistas. Além disso, os acordos firmados entre os participantes da cooperativa devem ser apresentados à distribuidora, juntamente com a Solicitação de Orçamento de Conexão, acarretando despesas, em contraste com modelos como a Associação.

#### 2.4.4.3 Associação

A Associação engloba a união de pessoas para fins não lucrativos, admitindo tanto pessoas físicas quanto entidades jurídicas para sua formação, requerendo um mínimo de duas pessoas.

Trata-se de uma instituição que proporciona maior flexibilidade ao modelo de negócio, uma vez que não impõe direitos e obrigações recíprocos entre os associados. A adesão ocorre mediante Termo de Adesão, enquanto a desistência se dá por meio de um Termo de Saída.

#### 2.4.5 *O mecanismo de compensação de créditos previsto na Lei n.º 14.300 – Norma de Transição*

A propósito da transição, destaca-se a modificação dos percentuais para compensação no âmbito do Sistema de Compensação de Créditos de Energia Elétrica, permanecendo o esquema delineado na Resolução Normativa ANEEL n.º 482/2012. A norma estabeleceu uma regra de transição para ajustar os índices de redução das faturas de energia provenientes de sistemas de micro e minigeração distribuída.

No caso de unidades consumidoras que buscarem o acesso à micro ou minigeração distribuída após o período de 12 (doze) meses após a promulgação da Lei 14.300/22, estabeleceu-se que os seguintes percentuais devem ser deduzidos dos componentes tarifários correspondentes à remuneração dos ativos de distribuição, à parcela de reintegração regulatória (depreciação) dos ativos de distribuição e aos custos de operação e manutenção do serviço de distribuição:

- 15% (quinze por cento) a partir de 2023;
- 30% (trinta por cento) a partir de 2024;
- 45% (quarenta e cinco por cento) a partir de 2025;
- 60% (sessenta por cento) a partir de 2026;
- 75% (setenta e cinco por cento) a partir de 2027;
- 90% (noventa por cento) a partir de 2028.

Dentro da estrutura tarifária atual do Ambiente de Contratação Regulada (ACR), esses elementos tarifários estão encapsulados dentro da TUSD – Componente de Fio B.

#### **2.4.6 Aplicação da TUSDg**

A Lei 14.300/22 incorporou a disposição de aplicar a tarifa predominante conforme a atividade de geração ou consumo efetuada na unidade consumidora que é beneficiária do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Conseqüentemente, a partir da revisão tarifária subsequente à promulgação da lei, é possível que a TUSD - segmento geração seja aplicada às unidades com micro ou minigeração distribuída em suas instalações.

No contexto do projeto em questão, é importante notar que a distribuidora Enel Ceará, já passou por um processo de revisão tarifária após a promulgação do Marco Legal da Geração Distribuída. A Resolução Homologatória ANEEL n° 3.185, de 18 de abril de 2023, foi resultado desse processo de revisão tarifária. Portanto, a partir dessa data em diante, a Tarifa do Uso do sistema de distribuição - segmento geração (TUSDg) deve ser aplicada. A Tabela 1 apresenta os valores aplicáveis de TUSDg por subclasse tarifária, sem a inclusão dos tributos Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Programas de Integração Social (PIS)/Programa de Formação do Patrimônio do Servidor Público (PASEP) e Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS). É importante observar que para o Grupo B, existem duas variações de TUSD de geração. A TUSDg Tipo 1 será cobrada do consumidor quando não houver a necessidade de obras para aumentar a capacidade da rede de conexão do empreendimento, enquanto a TUSDg Tipo 2 se aplica quando há a necessidade de tais obras de expansão da rede para a conexão.

Tabela 1 – Tarifas TUSD por subclasses tarifárias da Enel Ceará

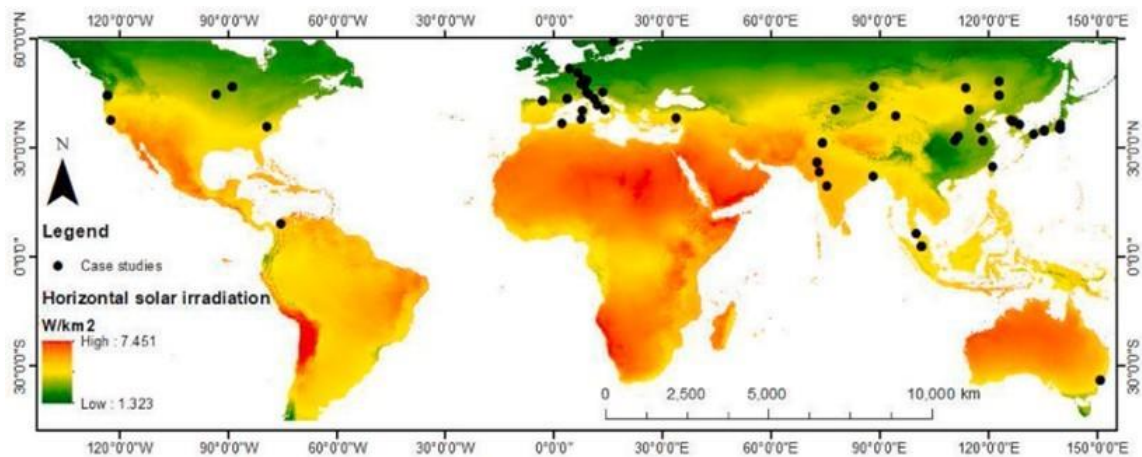
Subclasse	Tipo	TUSD geração (R\$/kW)
A4 (2,3 a 25 kV)	-	15,06
Grupo B	1	11,67
Grupo B	2	27,97

Fonte: Resolução Homologatória ANEEL n° 3.185, de 18 de abril de 2023

## 2.5 Exemplos de sistemas agrivoltaicos nos continentes

Nos anos 2000, as primeiras usinas-piloto agrivoltaicas foram construídas e pesquisadas primeiro no Japão e depois na Alemanha e na França, conforme apresentado na Figura 6. O Japão introduziu o primeiro programa de apoio governamental em 2013 e registrou mais de 1.900 usinas agrivoltaicas em 2018.

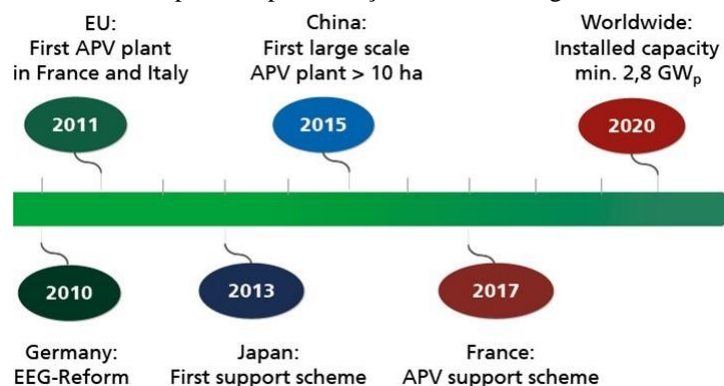
Figura 6 – Mapa global de irradiação horizontal mostrando 49 estudos de casos de sistemas agrivoltaicos implantados.



Fonte: (Mamun *et al.*, 2022b)

O Japão foi seguido por China, França, Estados Unidos e Coreia com subsídios governamentais para agrivoltaicos, aumentando a capacidade média global das usinas. O maior projeto agrivoltaico até hoje, o cultivo de goji berries (*Lycium chinense*), foi implementado na China na beira do deserto de Gobi e atualmente está sendo ampliado para 1 GWp (Fraunhofer, 2022), conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Linha do tempo da implementação de sistemas agrivoltaicos.



Fonte: (Fraunhofer, 2022)

Um fator externo importante para a viabilidade econômica de um sistema agrivoltaicos é uma política pública relevante. Por exemplo, no Japão, o sistema Feed-in tariff - Tarifa subsidiada (FIT), Contrato de oferta padrão), um suporte nacional para a implantação de eletricidade de energia renovável (ER), foi introduzido em julho de 2012. Ele permite a recuperação do investimento em eletricidade de ER, fixando o preço da energia por 10 a 20 anos (IRIE *et al.*, 2019). FIT é uma política destinada a apoiar o desenvolvimento de fontes de energia renováveis, fornecendo aos produtores um preço garantido acima do mercado. Isso geralmente significa garantir aos produtores de energia em pequena escala um preço acima do mercado pelo que entregam à rede. Os FITs geralmente envolvem contratos legados, de 15 a 20 anos (Couture *et al.*, 2010).

### **2.5.1 América do Norte**

Na América do Norte, a Universidade de Arizona, nos Estados Unidos, construiu um sistema agrivoltaico de 21,6 kW em sua fazenda experimental (*Biosphere 2*). O sistema é composto por módulos solares instalados em suportes elevados a 3 metros do chão, permitindo que a luz solar alcance as plantas abaixo e seja possível fazer a colheita dos alimentos. São cultivados sob os painéis: tomate, abóbora, feijão e manjeriço. (O'Callaghan, 2013).

O projeto solar *Agua Caliente*, a maior usina fotovoltaica do Arizona, vende toda a sua produção sob um contrato de 25 anos para uma empresa de serviços públicos com sede na Califórnia, *Pacific Gas and Electric* (Majumdar *et al.*, 2019). Esses mecanismos de política podem ser aplicados de forma semelhante a negócios agrivoltaicos para reduzir riscos e garantir vendas de eletricidade para ganhos econômicos de longo prazo.

### **2.5.2 América do Sul**

No Brasil, um projeto-piloto de sistemas agrivoltaicos foi implementado em uma plantação de abacaxis em Pernambuco. O sistema consiste em painéis solares montados em postes que permitem que os abacaxis cresçam embaixo deles (Cavalcanti *et al.*, 2019). O sistema demonstrou um aumento na produtividade da plantação, além de produzir energia elétrica limpa.



### 2.5.3 *Europa*

Na França, um sistema agrivoltaico de 3MW foi instalado em uma vinha na região de Provença-Alpes-Costa Azul pela empresa Voltalia. O sistema é composto por painéis solares montados em uma estrutura com *tracker* solar e com possibilidade de alterar a inclinação dos painéis considerando as necessidades das vinhas. O sistema foi instalado a 4,20 m do chão, permitindo, assim, a passagem da colheitadeira. Nesse caso concreto, notou-se que o estresse hídrico foi menor e o peso das uvas foi maior em 17%, se comparado com a área que não utiliza o sistema agrivoltaico.

Na Alemanha, entre 2004 e 2010, as centrais fotovoltaicas montadas no solo foram assistidas através da Lei das Energias Renováveis, envolvendo também um FIT baseado no preço (Schindele *et al.*, 2020).

### 2.5.4 *Ásia*

Na Ásia, o Japão é um dos países líderes em sistemas agrivoltaicos. (Gonocruz *et al.*, 2021), implantou sistemas agrivoltaicos em diversas áreas do Japão e avaliou os resultados da produção de arroz abaixo dos painéis. Os resultados indicaram que o sombreamento influenciou diretamente na produção de alimento, elevando entre 23 a 36% a produção. O estudo ainda mostra que o sistema agrivoltaico pode funcionar como um catalisador da expansão da fonte renovável de energia e viabilizar o atingimento da meta de reduzir em 46%, em relação a 2013, as emissões dos gases de efeito estufa até 2030.

### 2.5.5 *África*

O projeto "Agrivoltaico para o Mali e a Gâmbia: Produção Sustentável de Eletricidade por Sistemas Integrados de Alimentação, Energia e Água"(APV-MaGa) foi iniciado com o objetivo de explorar o potencial da agrivoltaica em regiões quentes e semiáridas na África Ocidental, após a implementação bem-sucedida de projetos de pesquisa agrovoltaica em várias partes do mundo (Systems, 2023).

Financiado pelo Ministério Federal Alemão da Educação e Pesquisa (BMBF), o projeto visa aprimorar a resiliência do setor agrícola às mudanças climáticas e melhorar a produtividade, eficiência e sustentabilidade energética por meio da implementação de sistemas agrivoltaicos que fornecem eletricidade, água e alimentos.

As culturas a serem cultivadas nos sistemas foram escolhidas com base em resultados de pesquisas anteriores sobre o sombreamento das culturas e na consideração das práticas agrícolas existentes nas comunidades.

### **2.5.6 Oceania**

Na Austrália, um projeto-piloto de sistemas agrivoltaicos foi implementado em uma plantação de frutas no estado de Queensland, Austrália. O sistema é composto por painéis solares montados em postes que permitem que as frutas cresçam abaixo deles (Harvey *et al.*, 2020). O sistema aumentou a produção de frutas, além de fornecer energia elétrica limpa para a fazenda.

Esses exemplos mostram a diversidade de aplicações e benefícios que os sistemas agrivoltaicos podem trazer em diferentes contextos e regiões do mundo. A adoção de sistemas agrivoltaicos pode ajudar a resolver desafios como a produção de alimentos, a geração de energia limpa e a adaptação às mudanças climáticas.

## **2.6 Benefícios dos sistemas agrivoltaicos para a geração de renda e recuperação de áreas degradadas**

Os sistemas agrivoltaicos têm sido amplamente estudados e adotados em todo o mundo devido aos seus inúmeros benefícios econômicos, ambientais e sociais. Além de permitirem a produção simultânea de energia solar e cultivos agrícolas, esses sistemas também podem gerar renda adicional para os agricultores e contribuir para a recuperação de áreas degradadas.

Um dos modelos de negócios mais comuns para a geração de renda é o aluguel de usinas solares para empresas e consumidores que desejam utilizar energia renovável (Laguarta *et al.*, 2019). O aluguel de usinas solares permite que os agricultores gerem receita adicional sem comprometer a produção agrícola. Além disso, o aluguel de usinas solares pode ser uma opção interessante para empresas que desejam utilizar energia renovável, mas não área disponível ou não deseja imobilizar capital para investir em seus próprios sistemas.

Outra maneira pela qual os sistemas podem gerar renda é por meio da produção de alimentos. A produção de alimentos pode ser realizada por meio de técnicas agrícolas adaptadas, como o uso de plantas de menor porte e o controle da densidade de plantio, que permitem a maximização da radiação solar disponível e a redução da competição por água e nutrientes entre

as culturas agrícolas e as plantas fotovoltaicas (Islam *et al.*, 2019).

Outro benefício importante dos sistemas agrivoltaicos é a recuperação de áreas degradadas. As áreas degradadas são aquelas afetadas pela atividade humana ou por fenômenos naturais, resultando em uma diminuição na qualidade do solo e na capacidade de suportar a produção agrícola. Esses podem ser uma opção interessante para a recuperação dessas áreas, uma vez que a instalação de painéis solares pode proteger o solo do sol e da erosão causada por ventos e chuvas. Além disso, a presença de plantas de menor porte abaixo dos painéis pode melhorar a qualidade do solo, aumentar a retenção de água e reduzir a erosão.

Em suma, abaixo estão alguns dos principais benefícios dos sistemas agrivoltaicos para a geração de renda:

- Geração de energia solar: Os painéis solares instalados no sistema são capazes de gerar eletricidade que pode ser injetada na rede elétrica e vendida para a distribuidora de energia, gerando uma fonte adicional de renda para os agricultores.
- Redução dos custos de irrigação: Outra vantagem dos sistemas agrivoltaicos é a redução dos custos de irrigação. A sombra proporcionada pelos painéis solares reduz a evaporação da água e evita a perda de umidade no solo, o que pode reduzir o uso de água e, portanto, os custos associados à irrigação.
- Aumento da produtividade: Os sistemas agrivoltaicos também podem aumentar a produtividade das culturas. A sombra proporcionada pelos painéis solares reduz a temperatura do solo, o que intensifica o desenvolvimento de algumas culturas.
- Diversificação da renda: Os sistemas agrivoltaicos oferecem aos agricultores uma fonte adicional de renda. Ao combinar a produção de energia solar com a agricultura, os agricultores podem diversificar suas fontes de renda e reduzir a dependência exclusiva da produção agrícola.
- Valorização da terra: A instalação de sistemas agrivoltaicos valoriza a terra. Os proprietários de terras que investem em sistemas agrivoltaicos tem um aumento no valor de suas propriedades.

## **2.7 Custos associados a um sistema agrivoltaico**

O apoio financeiro dos governos continua sendo o fator mais influente em projetos agrivoltaicos. De acordo com um estudo de 2020, o Levelized cost of electricity - Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) do agrivoltaicos (0,0828 e/kWh) é 38% maior quando comparado ao do

sistema fotovoltaico montado em solo (Mulhern, 2020).

A adoção de sistemas agrivoltaicos implica, assim, um investimento substancial considerando a sua aplicação a longo prazo. Uma análise do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico sem dupla utilização revelou um período de retorno inferior a cinco anos, mesmo em locais de baixa radiação solar (Laleman *et al.*, 2011). Um estudo de 2021 constata que o custo inicial de um sistema agrivoltaicos é devolvido em nove anos, enquanto, no caso de energia solar montada no solo e no telhado, os períodos são de oito e seis anos, respectivamente (Agostini *et al.*, 2021).

Dependendo da cultura, outra pesquisa estimou o período de retorno dos agrivoltaicos no cultivo de tomate, brócolis e cogumelos entre quatro e oito anos (Li *et al.*, 2017). Majumdar e Pasqualetti afirmam que aproximadamente 50% do investimento na compra de terras agrícolas poderia ser devolvido em dois anos se uma fazenda tradicional fosse aprimorada com aparelhos agrivoltaicos (Majumdar *et al.*, 2018). Assim, a adoção bem-sucedida de sistemas solares fotovoltaicos pode resultar em benefícios econômicos potencialmente grandes.

## **2.8 Produções agrícolas sinérgicas com sistemas agrivoltaicos**

A produção agrícola sinérgica com sistemas agrivoltaicos é uma forma de integrar a geração de energia solar com o cultivo de plantas. Essa integração pode trazer benefícios tanto para o setor elétrico quanto para o agrícola, como reduzir a competição por terras, aumentar a eficiência do uso da água e da radiação solar, e diversificar as fontes de renda dos agricultores. Neste contexto, será apresentado os conceitos, as vantagens e os desafios dessa forma de produção sustentável.

### **2.8.1 *Resumo de fisiologia vegetal***

A fotossíntese é um processo vital para a sobrevivência das plantas, pois é por meio dela que as plantas produzem sua própria energia, transformando a energia luminosa em energia química. Durante a fotossíntese, as plantas absorvem a luz do sol através das moléculas de clorofila presentes nas células do mesófilo das folhas (Ferreira, 1988). As moléculas de clorofila absorvem a energia luminosa e a convertem em energia química, usada para produzir açúcares e outras moléculas orgânicas (Marschner, 1995).

No entanto, além da fotossíntese, as plantas também realizam a respiração celular,

que é o processo pelo qual as células quebram as moléculas orgânicas produzidas durante a fotossíntese para produzir energia. Durante a respiração celular, as plantas usam o oxigênio e liberam dióxido de carbono, sendo o oposto do que ocorre na fotossíntese (Ferreira, 1988). A taxa de crescimento vegetativo é influenciada por vários fatores, incluindo a disponibilidade de nutrientes e a intensidade luminosa. A medição da fixação de  $CO_2$  em folhas permite construir curvas de resposta à luz, que fornecem informações úteis sobre as propriedades fotossintéticas da folha (Hopkins *et al.*, 1995).

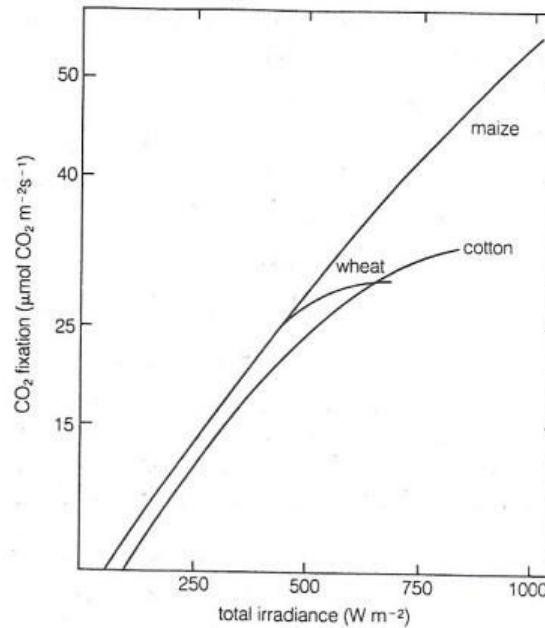
As plantas de sombra são adaptadas a ambientes com menor intensidade luminosa e, portanto, possuem uma menor taxa de fotossíntese em relação às plantas de sol. No entanto, elas também têm uma taxa de respiração menor, o que significa que produzem menos  $CO_2$  por unidade de tempo (Salisbury *et al.*, 1992). Isso resulta em um ponto de compensação luminoso menor, ou seja, a intensidade de luz mínima necessária para que a taxa de fotossíntese seja igual à taxa de respiração é menor nas plantas de sombra do que nas plantas de sol. Para ilustrar, na Figura 8 observa-se na curva que, em determinado ponto, o aumento da luz não provoca mais aumentos na taxa de fotossíntese. Neste caso, diz-se que ocorreu a saturação. As plantas de sombra mostram saturação em baixos níveis de luz (Salisbury *et al.*, 1992). Essa adaptação é importante para a sobrevivência das plantas em ambientes de baixa luminosidade, pois permite que elas produzam energia suficiente para crescer e se reproduzir, mesmo em condições desfavoráveis (Taiz *et al.*, 1998).

O sombreamento é especialmente importante para as plantas que crescem em ambientes muito iluminados, como em regiões tropicais ou em áreas com exposição direta ao sol. Nessas condições, as plantas podem sofrer danos causados pela luz solar excessiva, como a fotoinibição, que é uma redução na taxa de fotossíntese devido ao excesso de luz. O sombreamento pode reduzir esses efeitos e permitir que as plantas cresçam mais saudáveis (Taiz *et al.*, 1998).

Além disso, o sombreamento pode afetar a competição entre plantas. Em áreas com alta densidade de plantas, as plantas que estão sob sombra podem ter uma vantagem competitiva em relação às plantas que estão expostas à luz solar direta. Isso ocorre porque as plantas sob sombra podem alocar mais recursos para o crescimento vegetativo e menos para a produção de flores e frutos (Salisbury *et al.*, 1992).

Portanto, o sombreamento pode ser uma ferramenta importante para o manejo de plantas, especialmente em áreas com alta densidade de plantio ou em ambientes muito iluminados. O conhecimento sobre os efeitos do sombreamento pode ajudar a maximizar a produtividade das

Figura 8 – Efeito da intensidade de radiação sobre a taxa de fotossíntese líquida de milho (*maize*) e de trigo (*wheat*) e algodão (*cotton*).



Fonte: (Salisbury *et al.*, 1992).

plantas e a reduzir o impacto negativo da luz solar excessiva sobre o seu crescimento.

### 2.8.2 Produção agrícola

Diversas pesquisas foram feitas em países no hemisfério norte do planeta para avaliar a interferência dos sistemas agrivoltaicos no cultivo agrícola e pecuarista. Os resultados estão expostos na Tabela 2, onde se tem que variedades tolerantes à sombra, como alface, rúcula e brócolis, foi considerado adequado para agrivoltaicos (Dinesh *et al.*, 2016).

Aqueles que podem crescer sob luz moderada incluem couve-flor, feijão, cenoura, coentro, cebola e pimenta (Wang *et al.*, 2017). Cogumelos, notavelmente, funcionam comparativamente bem em locais escuros (Li *et al.*, 2017).

Tabela 2 – Principais culturas tolerantes a sombra

Luz Baixa	Luz Moderada	Sombra total
Alfafa, rúcula, brócolis, mandioca, acelga, couve, alface, mostarda, salsa, cebolinha, espinafre, batata doce e inhame	Feijão, cenoura, couve-flor, coentro, pimentão verde e cebola	Cogumelo

Fonte: (Mamun *et al.*, 2022b)

Associado aos ganhos de produção de alimento, tem-se o benefício de insumos acessórios para produção rural. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos nas pesquisas

Tabela 3 – Interferências de um sistema agrivoltaico.

<b>Problemas</b>	<b>Impactos</b>
Captação de água da chuva	Cerca de 150.000 l de água da chuva podem ser captados por ano a partir de um SFV de 105 kWp, o que é suficiente para fornecer irrigação de cerca de 37,50 mm de água em 0,4 ha de terra.
	Os sistemas de captação de água da chuva podem fornecer água para limpar a poeira depositada nos módulos fotovoltaicos.
	Plantas com altos níveis fotossintéticos líquidos e alta tolerância ao sombreamento são mais indicadas.
Adequação das plantas	A produção de plantas herbáceas, forrageiras e hortaliças folhosas pode ser mantida ou mesmo aumentada desde que estejam bem adaptadas ao sombreamento.
Gado e pastoreio	Risco de danos ao painel solar por animais e vice-versa.
Sombreamento	A radiação disponível na cultura reduzida em cerca de 15-40% devido a um arranjo fotovoltaico corresponde a sombreamento moderado para a produção agrícola.
	A alface é uma cultura adequada para os sistemas agrivoltaicos, pois pode tolerar a sombra até 30%.

Fonte: (Mamun *et al.*, 2022b)

em diferentes localidades do hemisfério norte e, conseqüentemente, diferentes climas. Captação de água e sombreamento são os principais ganhos em regiões suscetíveis a desertificação, como é o exemplo do estado do Ceará, pois são um dos principais ofensores da produção nessas regiões.

## 2.9 Áreas suscetíveis à desertificação

As ASD no Brasil abrangem trópico semiárido, sub-úmido seco e área de entorno, ocupando cerca de 1.340.000 km<sup>2</sup> e atingindo diretamente 30 milhões de pessoas. Desse total, 180 mil quilômetros quadrados já se encontram em processo grave e muito grave de desertificação, concentrados principalmente nos estados do Nordeste, com 55,25% de todo o território atingido em diferentes graus de deterioração ambiental (Santana *et al.*, 2007).

### 2.9.1 Características

Processo de causas naturais e antrópicas, a degradação das terras e a desertificação trazem consigo conseqüências dramáticas e, em muitos casos, de difícil recuperação, gerando altíssimos custos sociais, econômicos e ambientais (Santana *et al.*, 2007).

O critério estabelecido para delimitação dessas áreas foi o Índice de Aridez, o qual é dado pela razão entre a precipitação e a Evapotranspiração (ET). De acordo com esse índice,

quando a razão estiver entre 0,05 e 0,20, o clima é considerado árido; na faixa entre 0,21 e 0,50, o clima é considerado semi-árido (Thornthwaite, 1941).

A desertificação, segundo a United Nations Convention to Combat Desertification - Convenção das Nações Unidas para Combater a Desertificação (UNCCD), é a degradação de terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas do planeta, designadas como terras secas. Significa a destruição da base de recursos naturais, como resultado da ação dos seres humanos sobre o seu ambiente, e de fenômenos naturais, como a variabilidade climática (Giulio *et al.*, 2016). É um processo, quase sempre lento, que corrói pouco a pouco a capacidade de sobrevivência de uma comunidade. A degradação da terra está ocorrendo em todas as zonas do planeta. A desertificação, por sua vez, descreve a degradação nas chamadas terras secas, que cobrem cerca de 41% da superfície da Terra e que abrigam mais de 38% da população global (Reynolds *et al.*, 2007). Passou a ser comum a expressão nos documentos da UNCCD, buscando compor uma avaliação global integrada (Sá *et al.*, 2020).

Segundo (Sá; Sá, 2007), a vegetação nativa do Bioma Caatinga, como um dos parâmetros mais importantes para avaliar o grau de perturbação ambiental da região semiárida, tem sido bastante modificada por ações antrópicas. Os estudos mais recentes indicam que a remoção dessa vegetação acarreta o empobrecimento dos solos, uma vez que aceleram os processos de desertificação (Maurano *et al.*, 2019). Esta substituição da vegetação natural por campos de cultivos e a utilização de queimadas, concorrem para o agravamento do problema.

A desertificação está extremamente relacionada com a mudança climática e com a perda de biodiversidade. No semiárido o elemento de interseção entre esses três graves problemas ambientais é o processo de desmatamento da Caatinga e a mudança no uso da terra (Sá *et al.*, 2020).

A mudança climática pode intensificar a desertificação através da alteração na quantidade e na distribuição espacial e temporal das chuvas; na radiação solar e nos ventos, interferindo nas propriedades e processos do solo, com implicações na diminuição de matéria orgânica e fertilidade do solo, tanto pela degradação da biomassa aérea como subterrânea, afetando negativamente a produtividade agrícola. No que lhe concerne, fenômenos extremos de secas e inundações levam a processos erosivos mais intensos (Sá *et al.*, 2020).

É importante destacar que as interações entre mudança climática e desertificação são complexas e podem se retroalimentar, como quando há liberação de carbono armazenado no solo



e vegetação durante processos de degradação da terra e esse contribui para o aquecimento global (Shukla *et al.*, 2019). A diminuição da cobertura vegetal influi no microclima local e aumenta a quantidade de radiação solar refletida pela superfície terrestre.

A mudança climática será um dos fatores diretos de maior influência nas alterações dos padrões e respostas da biodiversidade nos próximos 50 anos (Bellard *et al.*, 2012). À medida que a fauna e a flora não conseguem acompanhar as novas temperaturas com adaptação ou aclimatação, ou se deslocar para locais com o clima adequado, a extinção poderá ser muito mais rápida, quando comparada à que ocorreu durante os ciclos glaciais (Barnosky *et al.*, 2011). Pode ocorrer mudança na distribuição geográfica, na abundância, além das alterações do ciclo de vida das espécies (Silva, 2018b). O aumento da temperatura e a incidência de secas, resultantes desse processo, podem alterar a distribuição, a densidade e a prevalência de doenças transmitidas por vetores (dengue, leishmanioses, malária, febre-amarela, etc.), e levar à adaptação de vetores e hospedeiros a novos ciclos de transmissão em vista do impacto das condições climáticas no desenvolvimento, no comportamento e na vida-útil de muitos insetos (Mills *et al.*, 2010).

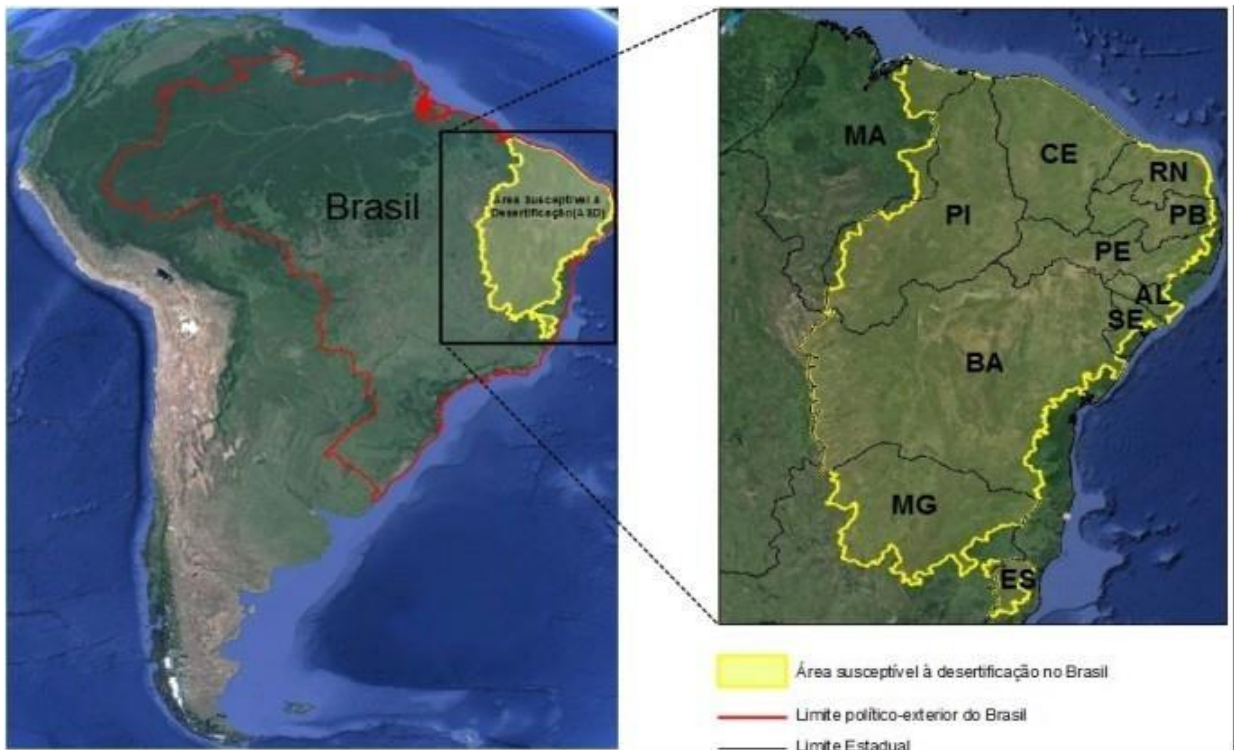
### **2.9.2 Localização**

No Brasil, a ASD engloba majoritariamente o Nordeste. O Estado do Ceará encontra-se completamente englobado pela área suscetível à desertificação, o que implica que todo o seu território está propenso a se tornar desértico, conforme a Figura 9. A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) determinou o nível de ocorrência de desertificação nos municípios cearenses, conforme é apresentado na Figura 10 (FUNCEME, 2022). Três mesorregiões tem destaque pela ocorrência muito grave da desertificação: Centro Norte, Inhamuns e Jaguaribe.

### **2.9.3 Metodologia de tratamento existente**

São necessárias medidas e ações sistêmicas de conservação da vegetação nativa, assim como de restauração ecológica, envolvendo criação de novas unidades de conservação, conservação e incremento de corredores ecológicos, até ações de reflorestamento onde for possível técnica, social e economicamente. Mas também é imprescindível inovar na lógica da conservação produtiva, com incentivo à implantação de cercas vivas, práticas agroflorestais e silvopastoris que diminuam impactos na biodiversidade e deem respostas econômicas aos

Figura 9 – Área suscetível à desertificação no Brasil.



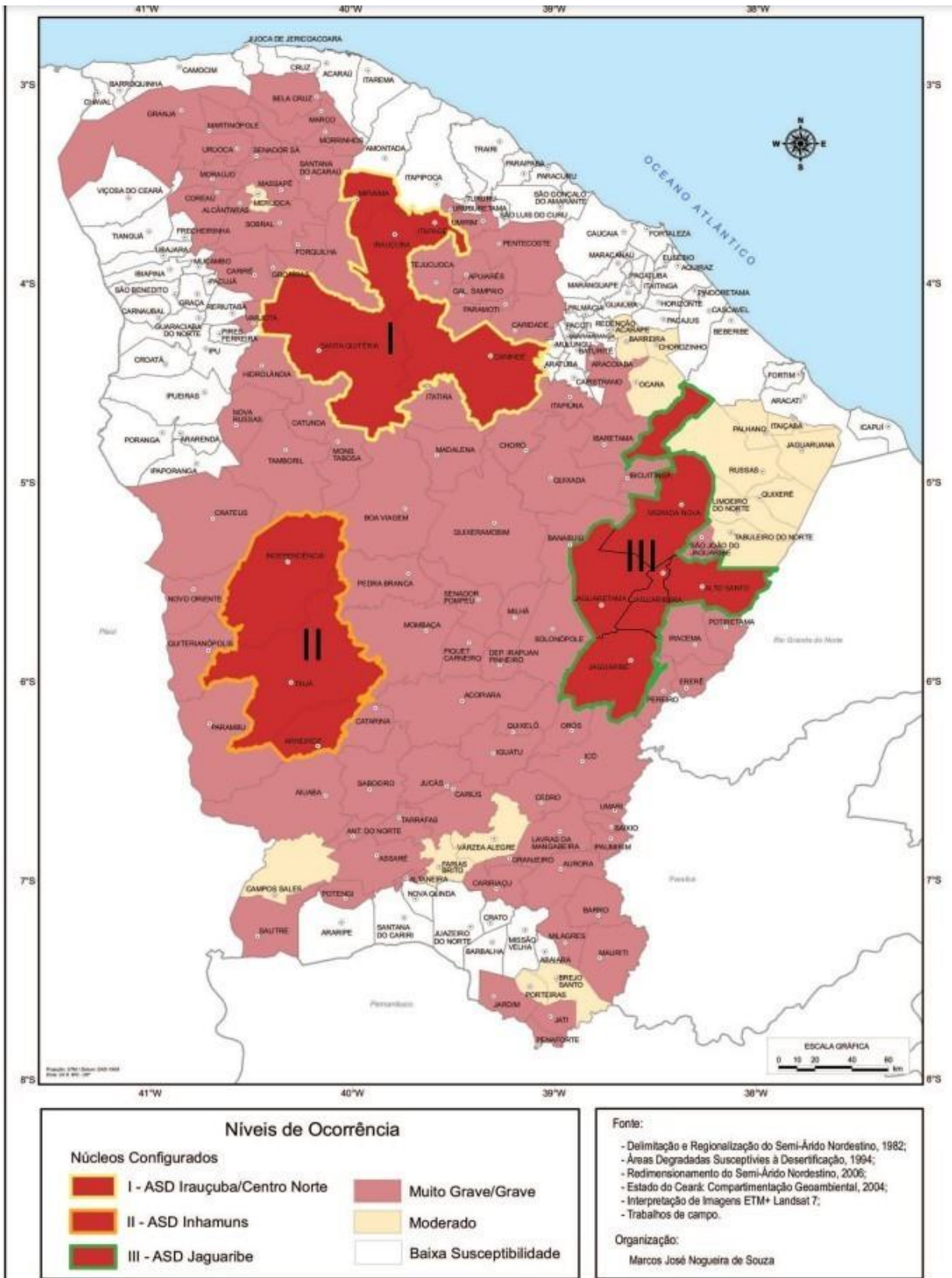
Fonte: (FUNCEME, 2022).

agricultores e agricultoras, principalmente aos de base familiar. Os impactos atuais e os riscos futuros associados a eventos extremos exigem soluções sustentáveis para a adaptação à mudança climática e a redução de riscos de desastres (Sá *et al.*, 2020).

A variedade de estratégias disponíveis para adaptação à mudança climática e redução de riscos de desastres inclui abordagens estruturais, relacionadas ao aprimoramento nos sistemas de armazenamento de água, que no caso do semiárido requer olhar para as sedes municipais inseridas em sistemas de distribuição, mas também para a população rural dispersa, para a qual é importante contar com fontes variadas de água e sistemas simplificados envolvendo as comunidades locais (Cavalcanti, 2015).

Por sua vez, também são imprescindíveis as abordagens não estruturais que vão desde mecanismos de apoio econômico em caso de eventos extremos, a sistemas de previsão e alerta precoce, planejamento do uso da terra e desenvolvimento de capacidades baseadas em educação e comunicação (Sá *et al.*, 2020).

Figura 10 – Núcleos de áreas suscetíveis a desertificação.



Fonte: (Ceará, 2010).

#### 2.9.4 Desertificação e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável enfatiza fortemente a abordagem integrada para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Significa não só abordar os temas e questões decorrentes de forma articulada, mas também desenvolver ações sinérgicas, que minimizem possíveis conflitos de escolha sobre o que priorizar, evitando que respostas positivas a um determinado problema desencadeiem efeitos negativos em outra dimensão. O tema da desertificação aparece de maneira mais explícita no ODS 15 que trata de “Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade”. O enunciado desse ODS já é bastante integrador, demonstrando a relação indiscutível entre o equilíbrio dos ecossistemas como forma de evitar e/ou reverter os processos de degradação da terra (Sá *et al.*, 2020).

A meta trata diretamente do tema da desertificação e estabelece: até 2030, combater a desertificação, e restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo. Tem como indicador global o percentual da terra degradada sobre o total da área da terra. O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) destaca a relação dessa meta com outros ODS (Silva, 2018a):

- ODS 1 - Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares;
- ODS 2 - Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável;
- ODS 6 - Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos;
- ODS 8 - Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos e todas;
- ODS 10 - Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles;
- ODS 12 - Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis; e
- ODS 13 - Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos.

Evitar a degradação da terra, no sentido contido na UNCCD, diz respeito não apenas parar processos de degradação do solo, mas inclui também cuidar dos recursos hídricos, da cobertura florestal e das condições de vida das pessoas, o que pode desempenhar um papel importante na aceleração da conquista de muitos ODS. Manter e restaurar os recursos da

terra pode desempenhar um papel vital no enfrentamento das mudanças climáticas, garantir a biodiversidade e manter serviços cruciais dos ecossistemas, possibilitando, simultaneamente, prosperidade e bem-estar compartilhados. Terras saudáveis e produtivas podem desempenhar um papel incomparável como um mecanismo de crescimento econômico e uma fonte de subsistência para bilhões de pessoas em todo o mundo, incluindo as populações mais vulneráveis. Atingir a Neutralidade da Degradação da Terra (LDN) pode se tornar um acelerador da consecução dos ODS em geral (Sá *et al.*, 2020).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, tem-se como objetivo a modelagem de um sistema agrivoltaico que capte a água da chuva, permita o cultivo de plantas nativas da caatinga e gere energia elétrica pelo sistema fotovoltaico. Além disso, será determinada a expectativa de captação de água do sistema, bem como o indicativo de uma cultura que influencie positivamente a captura de carbono.

Outra fonte de renda será por meio da locação do equipamento do sistema fotovoltaico, que atenderá de maneira remota o consumo de qualquer unidade consumidora conectada na mesma distribuidora de energia.

#### 3.1 Definição de premissas do sistema agrivoltaico

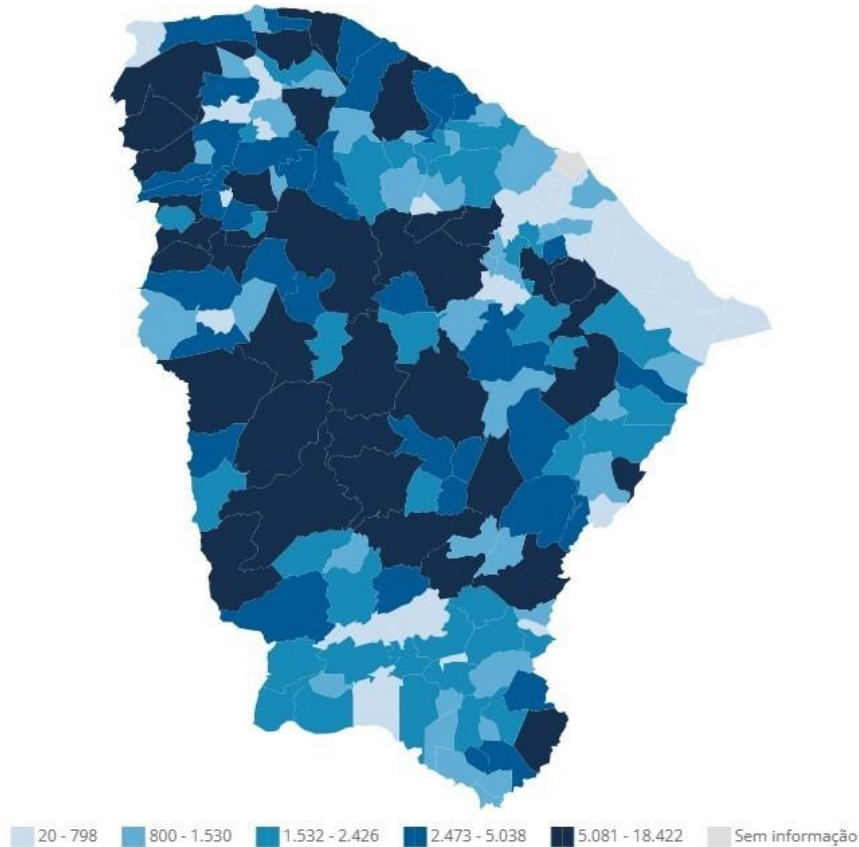
As premissas fundamentais que constituem a base do sistema agrivoltaico proposto serão meticolosamente examinadas. Serão abordados aspectos primordiais que orientam a concepção e implementação desse sistema. Será realizado um exame das seguintes premissas: seleção da cultura agrícola, determinação das áreas de implantação, estruturação do arranjo do sistema proposto, delimitação do mecanismo de captação de água e elaboração do modelo de negócio.

##### 3.1.1 Escolha da cultura agrícola

A escolha da cultura se deu observando o valor agregado, familiaridade da região com a produção e adaptação da cultura a região suscetível à desertificação. Dentre os aspectos avaliados, o feijão-de-corda (*Vigna unguiculata*) se apresentou como melhor alternativa, visto que ele é amplamente cultivado em áreas suscetíveis a desertificação, foi vendido, em 2021, em média por R\$ 4,86/Kg, tem um rendimento médio de 295 Kg/ha e Tamboril, cidade integrante do núcleo I de ASD, foi o maior produtor do estado com R\$ 18.442 mil reais (Figura 11).

Não obstante, o feijão se apresenta como uma interessante alternativa, pois apesar da cultura ser adaptada aos solos de várzea e de terra firme, solos com baixa fertilidade também podem ser utilizados no seu cultivo, desde que sejam aplicados corretivos e fertilizantes. O feijão-de-corda pode ser cultivado em sistemas de cultivos múltiplos para melhor utilização dos recursos disponíveis, como consórcio e em rotação de culturas. Assim, tem-se como vantagens a elevação de renda, maior produção total por área, uso de mão de obra familiar, controle de erosão e diversificação da dieta alimentar e uma maior eficiência no controle de ervas daninhas e

Figura 11 – Mapa - Feijão - Valor da produção (Mil Reais).

**Mapa (23) - Feijão - Valor da produção (Mil Reais)****Fontes**

**EAM:** Valor da produção, Quantidade produzida, Área colhida, Rendimento médio, Maior produtor

Fonte: (Estatística, 2021).

doenças (Filho *et al.*, 2017).

O bom desenvolvimento da cultura ocorre na faixa de temperatura de 18°C a 34°C e exige, aproximadamente, 300 mm anual de precipitação para produzir satisfatoriamente, sem a necessidade da prática de irrigação. As regiões cujas cotas pluviométricas oscilam entre 250 mm e 500 mm anuais são consideradas aptas para o desenvolvimento da cultura (Filho *et al.*, 2017). É

importante ressaltar que a escolha da cultura neste estudo foi feita com o intuito, apenas, de balizar o estudo de caso. Existem diversos tipos de culturas e criações citadas no capítulo de Fundamentação que podem ser substituídos e adaptados a cada região.

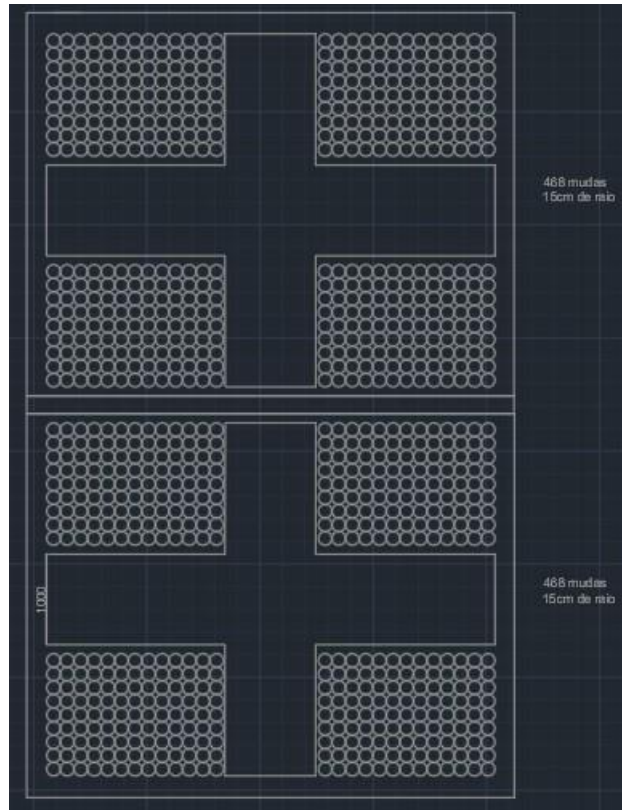
### 3.1.1.1 Produção de agrícola

As mudas abaixo dos módulos fotovoltaicos foram dispostas conforme a Figura 12. Foi necessário dedicar uma área abaixo dos painéis para circulação de pessoas. Essa área é



composta de dois corredores perpendiculares de 1 metro de largura.

Figura 12 – Disposição do cultivo de mudas.



Fonte: O autor.

Considerou-se que cada muda teria 15 cm de raio, assim pôde-se estimar que 936 mudas podem ser abrigadas pelo sistema.

O sistema agrivoltaico funcionará apenas como um berçário para as mudas. Após atingirem uma maturidade para serem plantadas no solo, serão direcionadas para uma área destinada ao plantio definitivo.

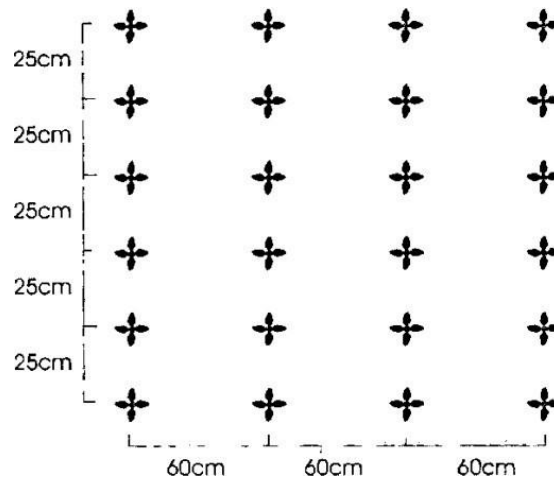
Viu-se que é necessário um espaçamento de 60 centímetros entre ruas e 25 centímetros entre covas (Cardoso, 2000), conforme a Figura 13. Dessa forma, as 936 mudas ocuparão uma área de 87,75 m<sup>2</sup>.

### 3.1.2 Escolha das áreas de implantação

A utilização de uma metodologia de tomada de decisão multicritério é essencial para definir de forma objetiva quais municípios devem ser priorizados para a construção de usinas fotovoltaicas visando a redução da suscetibilidade a desertificação. Problemas complexos que envolvem fatores qualitativos e quantitativos, com objetivos múltiplos e muitas vezes conflitantes,



Figura 13 – Disposição do plantio



Fonte: (Estatística, 2021).

requerem abordagens adequadas para auxiliar na seleção das melhores alternativas (Gomes *et al.*, 2002).

A abordagem multicritério de apoio à decisão é um conjunto de métodos que busca evidenciar o problema e avaliar as alternativas com base em múltiplos critérios, muitas vezes de caráter divergente. Dentre os métodos disponíveis, o Método Analytic Hierarchy Process - Processo de Hierarquia Analítica (AHP) e o Técnica para Ordem de Preferência por Similaridade com a Solução Ideal (TOPSIS) são amplamente utilizados e reconhecidos na literatura como técnicas eficazes para lidar com problemas complexos de tomada de decisão multicritério.

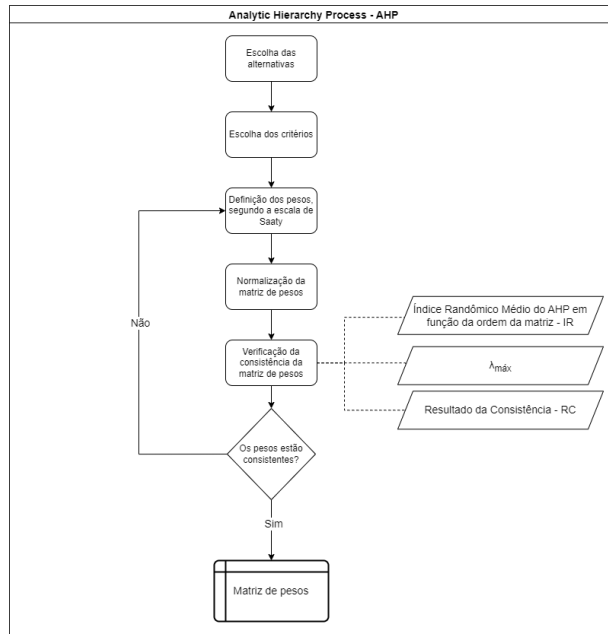
Adotou-se o método AHP-TOPSIS-2N, um método híbrido que combina as duas técnicas mencionadas. O Método AHP, ilustrado na Figura 14, é utilizado para estruturar a hierarquia dos critérios e subcritérios relevantes, bem como para determinar os pesos relativos desses critérios com base na opinião de especialistas.

Em seguida, o método TOPSIS, ilustrado na Figura 15, é aplicado para classificar as alternativas com base na similaridade com a solução ideal e a dissimilaridade com a solução pior.

A utilização de duas normalizações tem como objetivo principal lidar com características e unidades de medida diferentes presentes nos critérios avaliados, proporcionando uma análise mais precisa e equilibrada. Isso ajuda a evitar distorções ou desequilíbrios na análise, garantindo uma tomada de decisão mais consistente e fundamentada (Souza *et al.*, 2018).

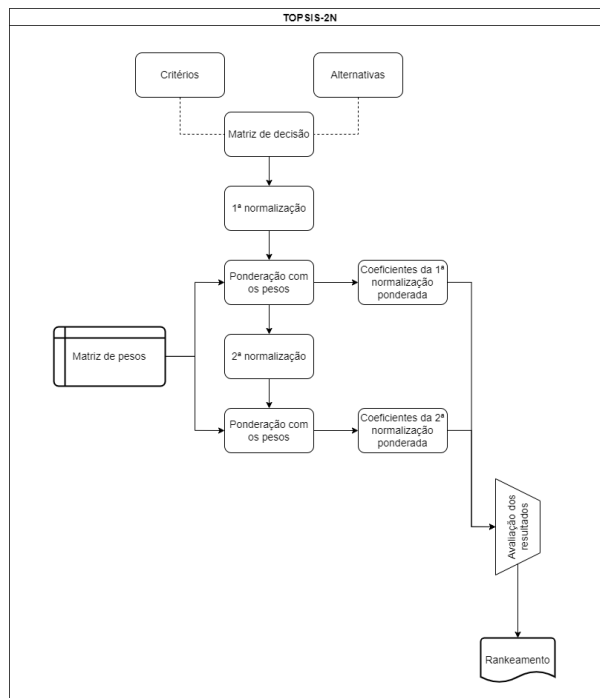
A utilização de uma metodologia de tomada de decisão multicritério, como o método AHP-TOPSIS-2N, permite uma abordagem sistêmica e objetiva na seleção dos municípios a serem priorizados, considerando a complexidade dos critérios envolvidos e garantindo uma

Figura 14 – Fluxograma de implantação do método AHP



Fonte: O autor.

Figura 15 – Fluxograma de implantação do método TOPSIS-2N



Fonte: O autor.

decisão embasada e consistente.

Para a aplicação do método em estudo são descritos os passos a seguir:

1. Escolha das variáveis e critérios considerados no projeto;
2. Definição da matriz de decisão: Expressa a pontuação de cada alternativa em relação a cada critério, mostrando o quanto uma alternativa domina ou é dominada pelas demais;
3. Definição da matriz de ponderação: Utilizando a Escala Fundamental de Saaty (Saaty *et al.*, 2015);
4. Determinação do peso de cada critério: Através da aplicação do método AHP. É importante avaliar a razão de consistência e caso ela seja superior a 1 (um) fazer uma nova avaliação dos critérios e uma nova matriz de ponderação;
5. Normalização da Matriz de Decisão: No caso do método AHP-TOPSIS-2N são utilizadas duas diferentes normalizações (Souza *et al.*, 2018);
6. Construção da Matriz de Decisão Normalizada Ponderada: As matrizes ponderadas pelo 1º e 2º normalização são ponderadas utilizando os pesos obtidos no passo 3;
7. Determinação da Solução Ideal Positiva (SIP) e da Solução Ideal Negativa (SIN);
8. Cálculo das medidas de distância: São obtidas medidas de distância euclidiana de cada uma das alternativas em relação a SIP e a SIN;
9. Cálculo da proximidade relativa à alternativa ideal: É obtida pela razão R igual a distância para o ponto SIN pela soma da distância ao ponto SIP e a distância para o ponto SIN; e
10. Ordenação das preferências.

A SIP é uma referência que representa o melhor desempenho possível para cada critério considerado na avaliação. Ela é obtida selecionando-se o valor máximo ou mais desejável para cada critério individualmente. A SIP representa o ponto de referência ideal que se busca alcançar ou se aproximar.

Por outro lado, a SIN é uma referência que representa o pior desempenho possível para cada critério. É obtida selecionando-se o valor mínimo ou menos desejável para cada critério individualmente. A SIN representa o ponto de referência que deve ser evitado ou minimizado.

Essas soluções ideais são usadas para calcular a distância entre as alternativas avaliadas e as referências ideais. A distância em relação à SIP mede o quão próximo uma alternativa está do desempenho ideal, enquanto a distância em relação à SIN mede o quão longe uma alternativa está do desempenho desejável. Essas distâncias são então utilizadas na análise de classificação e na seleção da melhor alternativa com base nos critérios estabelecidos.

Para a realização do estudo de caso se utilizou todos os municípios cearenses como alternativas e adotaram-se os seguintes critérios:

- Precipitação Anual Média (mm) – “Prec”;
- Evapotranspiração de referência média anual (mm) – “Eto”;
- Irradiância Global Horizontal (kWh/m<sup>2</sup>) – “GHI”; e
- Razão da área suscetível à desertificação em relação a área total do município – “% de ASD”.

Em parceria com o Programa Cientista-Chefe, Funceme e Secretaria da Infraestrutura do Estado do Ceará (Seinfra) obteve-se os dados necessários para a pesquisa. De posse dos dados realizou-se o método AHP-TOPSIS-2N.

A seleção de áreas adequadas para a implementação de um projeto de energia solar fotovoltaica requer uma cuidadosa consideração de vários critérios para garantir um desempenho e sustentabilidade ótimos. Esses critérios são frequentemente atribuídos a diferentes pesos com base em sua importância relativa no processo de tomada de decisão. No caso do projeto em questão, os seguintes critérios foram identificados, juntamente com seus respectivos pesos e objetivos:

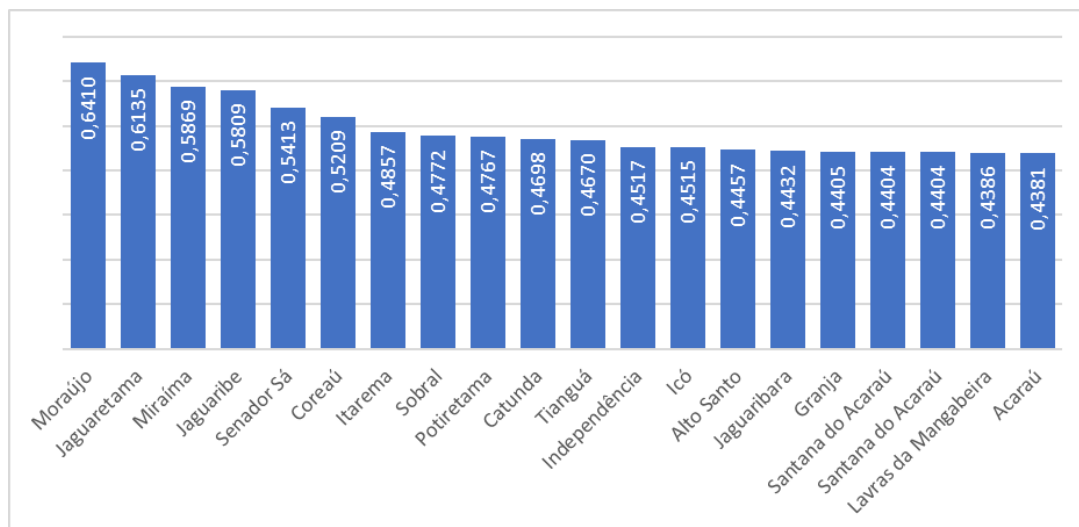
- Precipitação (peso de 47%, objetivo: Minimizar): A precipitação é um fator importante, pois afeta a disponibilidade de recursos hídricos, o que pode impactar o desempenho da plantação. O objetivo aqui é minimizar a precipitação, já que se deseja selecionar os municípios mais suscetíveis a desertificação;
- Evapotranspiração (peso de 7%, objetivo: Maximizar): Evapotranspiração se refere ao processo pelo qual a água é perdida da superfície do solo para a atmosfera por meio da evaporação e transpiração das plantas. É um fator importante na determinação da disponibilidade de água para agricultura e outros usos. O objetivo é maximizar a evapotranspiração, já que taxas mais altas de evapotranspiração indicam uma maior suscetibilidade à desertificação;
- Irradiância Global Horizontal (peso de 36%, objetivo: Maximizar): A Irradiância Global Horizontal (IGH) é uma medida da quantidade de radiação solar recebida em uma superfície horizontal. É um fator crítico na determinação do potencial de energia solar de uma localidade. O objetivo é maximizar a IGH, já que níveis mais altos de radiação solar indicam um maior potencial de geração de energia elétrica por meio de Sistema Fotovoltaico (SFV); e

- Razão da área suscetível à desertificação em relação a área total do município (%ASD) (peso de 59%, objetivo: Maximizar): O %ASD é uma medida da extensão em que uma área está em risco de desertificação, que se refere ao processo de degradação do solo em áreas áridas, semiáridas e sub-úmidas secas. O objetivo é maximizar o %ASD, já que percentuais mais baixos indicam municípios que podem já haver mecanismos para controle do processo de desertificação.

Esses critérios e seus respectivos pesos e objetivos fornecem uma abordagem sistemática para avaliar áreas potenciais para o projeto de energia solar fotovoltaica. Ao considerar esses fatores, pode-se tomar decisões informadas e selecionar áreas que sejam mais propícias ao sucesso e sustentabilidade do projeto.

Como resultado do processo obteve-se um ranking de prioridade dos municípios cearenses. A Figura 16 mostra os 20 municípios mais relevantes, em ordem, para implementação do projeto, segundo o ordenamento obtido pela metodologia.

Figura 16 – Proximidade relativa da solução ideal por municípios.



Fonte: O Autor.

### 3.1.3 Arranjo do sistema solar fotovoltaico

O painel solar adotado neste estudo foi o LR4-72HBD-445M, da Longi, com as seguintes especificações:

- Módulo monocristalino PERC, *Half cell*, Bifacial, 445 Wp, 144 células;
- Dimensões: 2094×1038×35 mm; e
- Peso: 27,5 kg.

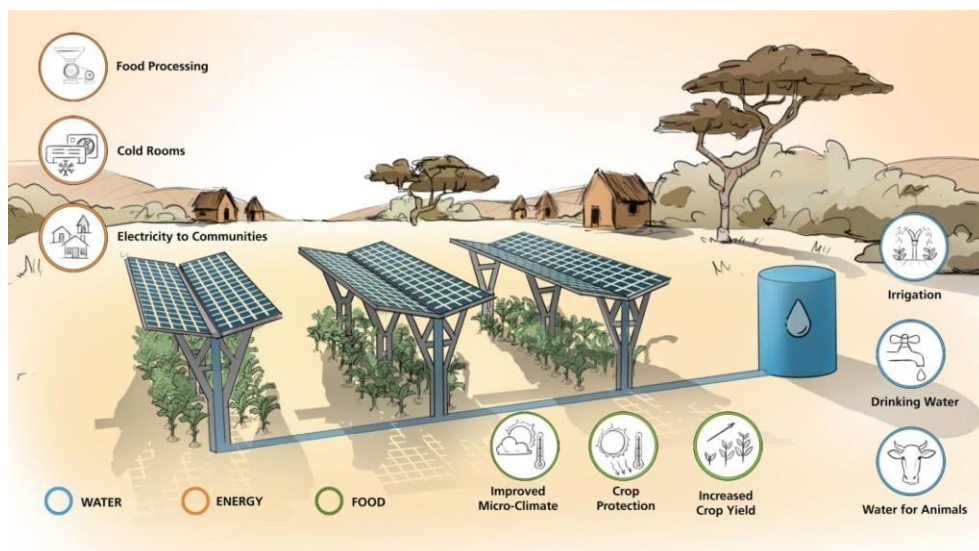
Visando a modularidade, fácil manutenção e alta eficiência, optou-se pelo uso dos microinversores APsystems, potência unitária de 1,20 kWac. Vale ressaltar, dentre outras características presente no *datasheet*, que a faixa de temperatura ambiente de operação se estende até +65°C, mostrando-se um equipamento adequado para as condições climáticas dos Ceará.

### 3.1.3.1 Definição da estrutura de suporte

Sabendo da forte necessidade de captação de água no Ceará devido à escassez de chuvas, optou-se por um arranjo inspirado no desenvolvido pela Associação Fraunhofer e implementado no projeto APV-MaGa (Systems, 2023).

Esse arranjo é caracterizado pela inclinação convergente dos módulos fotovoltaicos que permitem captação de água e uma estrutura que eleve os módulos fotovoltaicos a uma altura que permita a passagem de pessoas sob a usina, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Diagrama esquemático do projeto projeto APV-MaGa.

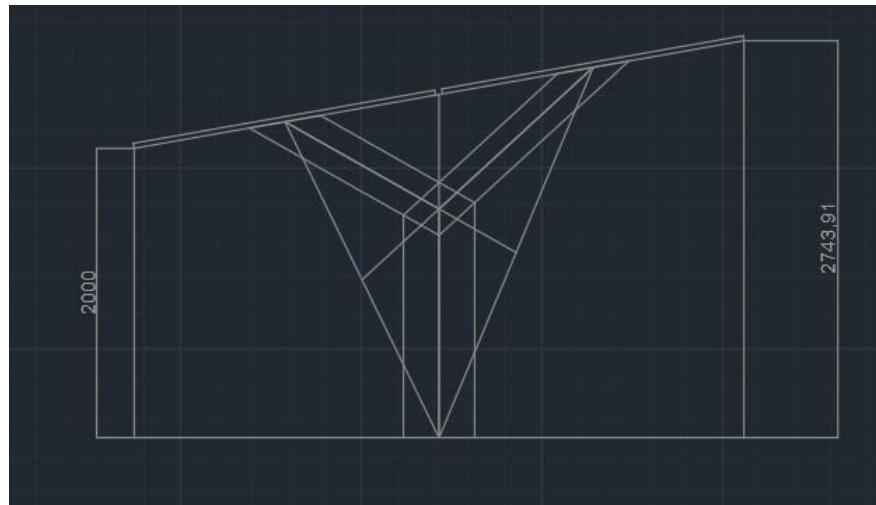


Fonte: (Systems, 2023).

O arranjo do sistema proposto foi desenvolvido de modo a ser de simples manutenção, baixo custo e replicável. A estrutura de suporte tem formato em “Y”, onde os pontos de apoio ficam alinhados com os centros de massa dos painéis e o ponto de interseção do "Y" é o baricentro do triângulo formado pelos três apoios, conforme mostra a Figura 18.

A estrutura de suporte foi projetada para suportar 20 módulos fotovoltaicos, propiciando uma inclinação de 10° em relação ao solo, de modo a facilitar o escoamento da água que porventura venha a se acumular nos módulos, conforme mostra a Figura 19.

Figura 18 – Características do sistema fotovoltaico.



Fonte: O autor.

Figura 19 – Modelagem tridimensional do sistema.



Fonte: O autor.

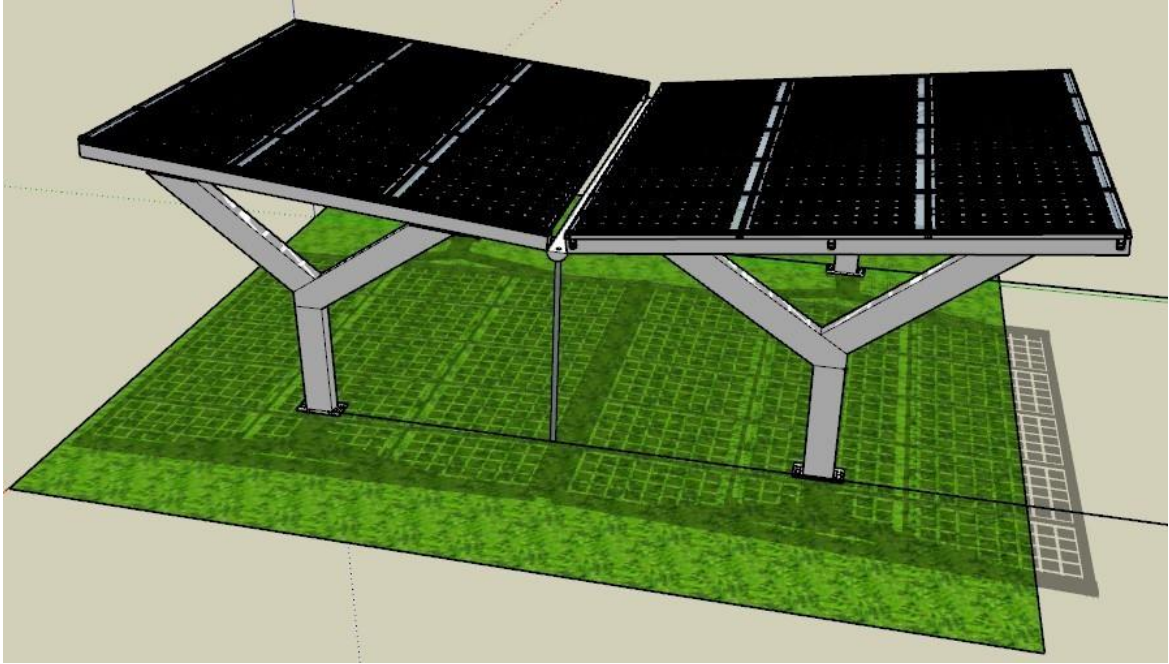
A estrutura de  $44,5\text{m}^2$  é dividida em duas partes, com inclinações convergentes, visando o acúmulo de água, cada uma suportando 10 módulos fotovoltaicos. Além disso, todos os pontos de apoio estão localizados nos centros de massa das cargas.

### 3.1.4 Mecanismo de captação de água

O sistema terá uma inclinação convergente que permitirá a captação de água, conforme a Figura 20. A captação da água será feita por meio de uma calha de 25cm diâmetro no

encontro das duas estruturas. A calha será afixada na estrutura de suporte dos módulos. Um cano direcionará a água da calha para um reservatório subterrâneo.

Figura 20 – Modelagem tridimensional do sistema agrivoltaico.



Fonte: O autor.

### 3.1.5 Modelo de negócio

Para desenvolvimento do projeto faz-se necessário uma participação governamental para viabilizar que o projeto seja realizado com a escalabilidade suficiente para atender, em grandes proporções, as áreas suscetíveis a desertificação. Para tanto deverá ser criado um programa governamental para geração de renda por meio dos sistemas agrivoltaicos.

No programa estadual o governo deve participar em três frentes: Unidade Gerenciadora de Projeto (UGP), agência, crédito e unidade consumidora.

#### 3.1.5.1 Unidade Gerenciadora de Projeto

A UGP será responsável por realizar o intermédio entre os beneficiários do programa e as empresas prestadoras de serviços, agência de crédito e governo estadual. Para tanto será necessário que seja feita uma procuração do beneficiário a UGP para que possa lhe representar perante os entes.

É de responsabilidade da UGP o cadastramento de empresas que tenham, com-



provadamente, o conhecimento e o acervo técnico para a execução de instalação de sistemas fotovoltaicos, bem como a sua operação e manutenção. Além disso, haverá o cadastramento de empresas que apresentem competências técnicas na gestão de créditos de energia elétrica, onde cabe a conferência da energia injetada pelo sistema com os créditos gerados e computados pela distribuidora de energia elétrica.

Essas empresas cadastradas participaram de um leilão para a implantação do sistema, operação, manutenção e gestão de créditos, visando o menor valor ofertado. Essa estratégia visa diminuir o investimento inicial e os custos associados a operação, assim como valorar adequadamente os projetos, uma vez que poderão ser distintos entre si, desde a localidade até a potência da usina.

#### *3.1.5.2 Agência de crédito*

O estado do Ceará possui uma agência de crédito, Ceará Credi, que disponibiliza dinheiro por meio de empréstimo, capacitação empreendedora e educação financeira para as pessoas que mais necessitam de apoio para se fortalecer e se estabelecer como empreendedoras.

No caso em questão, o Ceará Credi deverá ser a agência de crédito para realizar os empréstimos aos beneficiários do programa com uma taxa de juros baixa, em relação ao mercado, e uma carência que viabilize a execução do projeto.

O recurso para o financiamento pode originar do Tesouro Estadual, assim como de subvenções (financiamentos não-reembolsáveis) de grandes bancos. Pode-se citar o Banco Mundial (BM), Banco Europeu de Investimentos (BEI) e o Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW). Os bancos em comento têm diretrizes alinhadas com a transição energética e o fomento ao processo de descarbonização.

A subvenção é mais interessante, frente o uso do Tesouro Estadual, uma vez que não impacta os cofres públicos e permite que os projetos tenham uma carência maior e uma taxa de juros baixa.

#### *3.1.5.3 Unidade Consumidora*

O governo estadual deverá indicar suas unidades consumidoras, atendidas em baixa tensão, para receberem os créditos gerados pelas usinas fotovoltaicas instaladas nas propriedades dos beneficiados com o programa. Essas unidades terão uma redução direta na fatura de energia elétrica, bem como reduzirá suas emissões de carbono, uma vez que sua energia consumida será

proveniente de uma fonte renovável.

As unidades deverão ser atendidas em baixa tensão, haja vista que suas tarifas de aplicação de energia elétrica são as maiores, viabilizando, assim, um maior rendimento financeiro da energia gerada. Ademais, essas unidades têm uma tarifa monômnia, logo poderá reduzir seus custos ao máximo, podendo chegar a pagar apenas o custo de disponibilidade para a distribuidora de energia elétrica.

#### *3.1.5.4 Beneficiário*

O beneficiário do programa é o real tomador de crédito e o proprietário da usina solar fotovoltaica. Para participar do programa e se tornar um beneficiário atender os seguintes requisitos:

- Possuir, comprovadamente, a posse da terra;
- Ser cadastrado no CadÚnico;
- Exercer atividade agrícola; e
- Morar em uma área rural suscetível a desertificação.

O beneficiário deverá custodiar a usina e mantê-la em bom estado. Em caso de necessidade de manutenção, o beneficiário deverá acompanhar os técnicos e viabilizar a entrada em sua propriedade.

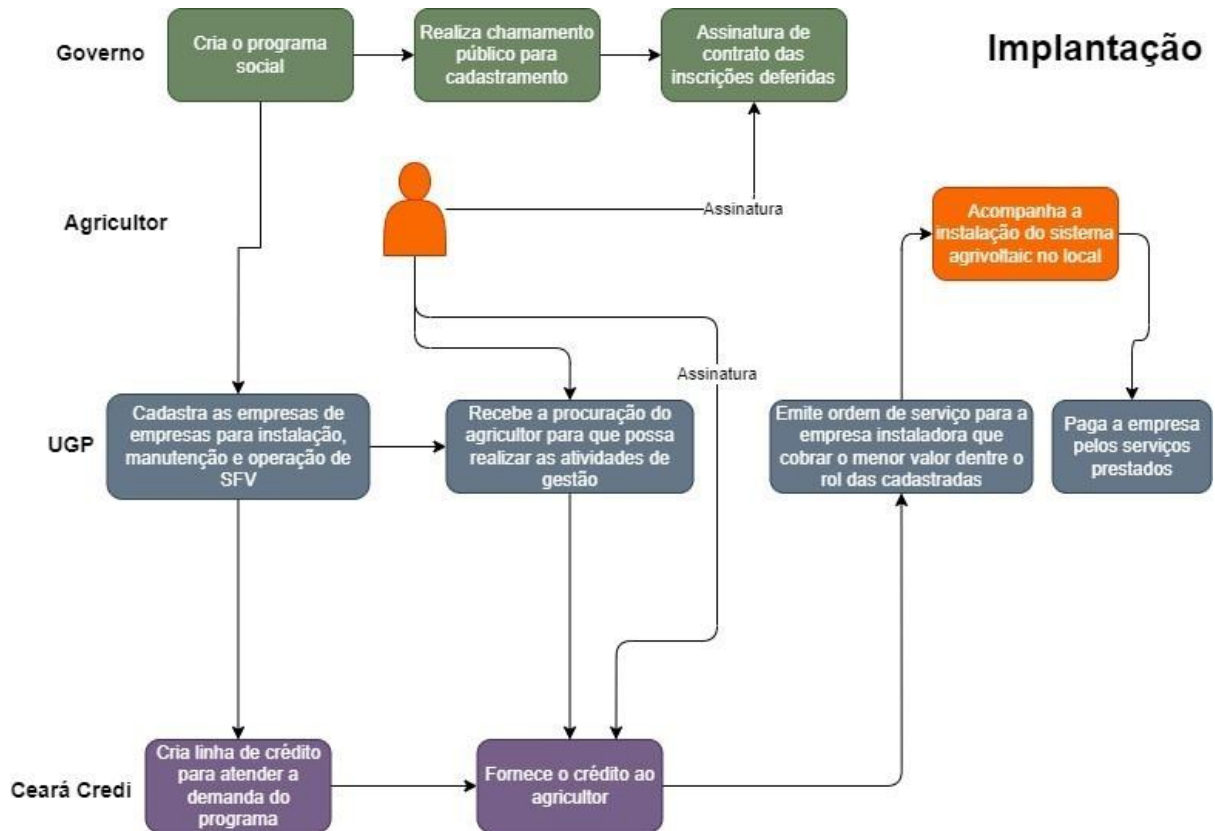
#### *3.1.5.5 Visão Geral do programa*

O programa envolve diversos atores e faz-se necessário uma visão holística para melhor entendimento. Um fluxograma da parte de implantação do programa é apresentado na Figura 21.

Assim, o governo deverá criar um programa estadual para viabilizar a execução do projeto. Com a criação do programa, a UGP deverá ser instituída e iniciar o cadastramento de empresas que realizarão a instalação, manutenção e operação dos sistemas fotovoltaicos propostos pelo programa, desde que apresentem acervo técnico coerente com os projetos. Simultaneamente, o Ceará Credi deve criar a linha de crédito para atender a demanda do programa.

Com a criação do programa, o governo deverá realizar um chamamento público para cadastramento dos possíveis beneficiários. Serão selecionados os cidadãos que obtiverem todos os requisitos solicitados. O chamamento público garante a isonomia de tratamento, dando a oportunidade de todas as pessoas que preenchem os requisitos mínimos de pleitearem uma

Figura 21 – Fluxograma de implantação do programa



Fonte: O autor.

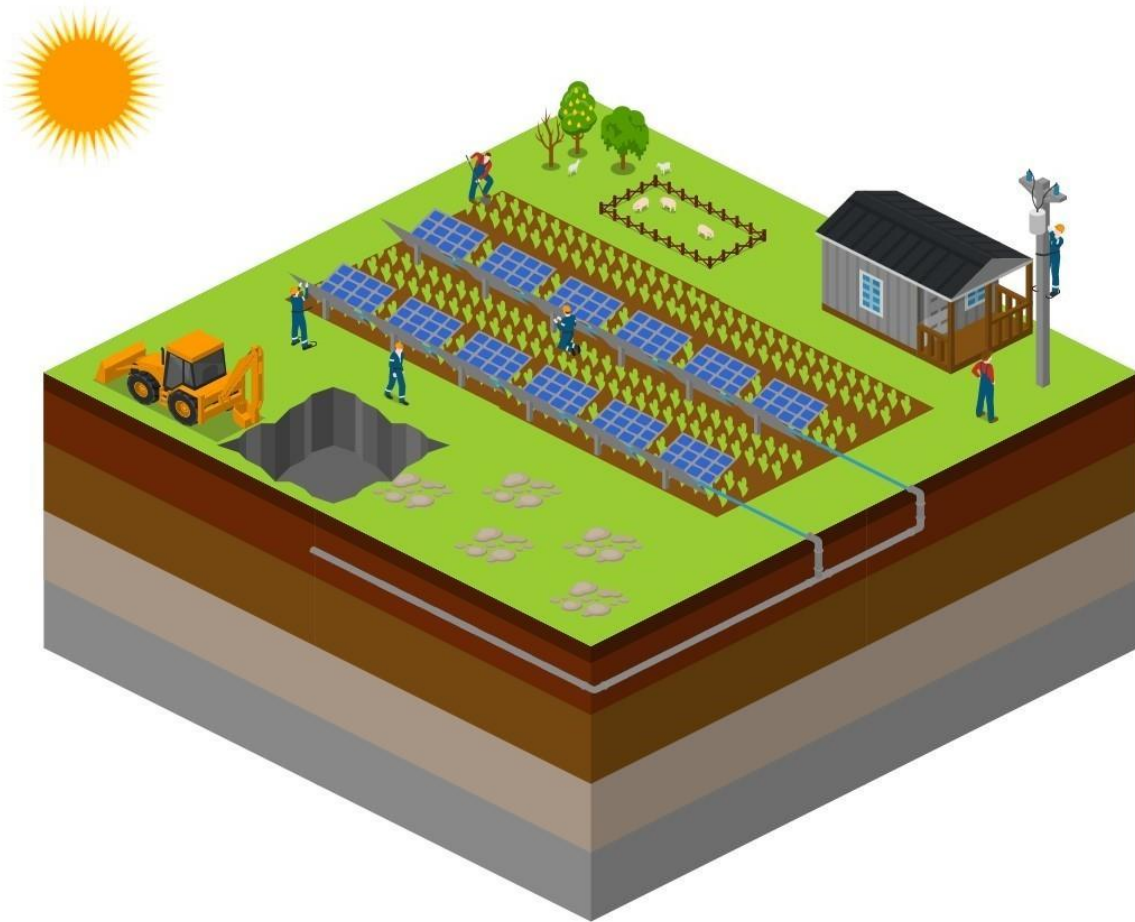
participação no programa.

Após a seleção, os beneficiários assinarão um contrato de locação de equipamentos e venda de créditos de carbono para o governo estadual. Com o contrato em mãos, o beneficiário deverá fornecer a UGP uma procuração para que ela possa realizar todas as atividades de gestão do projeto. Ademais, simultaneamente, o beneficiário deverá tomar o crédito fornecido pelo Ceará Credi para viabilizar financeiramente o projeto, uma vez que ele não tem recursos próprios para executar as atividades necessárias.

De posse da procuração e do recurso financeiro, a UGP deverá realizar um processo licitatório para contratação das empresas executoras do projeto. No certame licitatório, a empresa que apresentar o maior deságio em relação ao custo estimado do projeto calculado pela UGP será considerada a vencedora.

Após o término do processo licitatório, as empresas se dirigirão para instalar a usina no terreno destinado pelo beneficiário pelo programa. Este deverá acompanhar a execução e permitir a entrada das empresas em sua propriedade para desempenhar as atividades de instalação, comissionamento, operação e manutenção do SFV, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Instalação do sistema agrivoltaico.



Fonte: O autor.

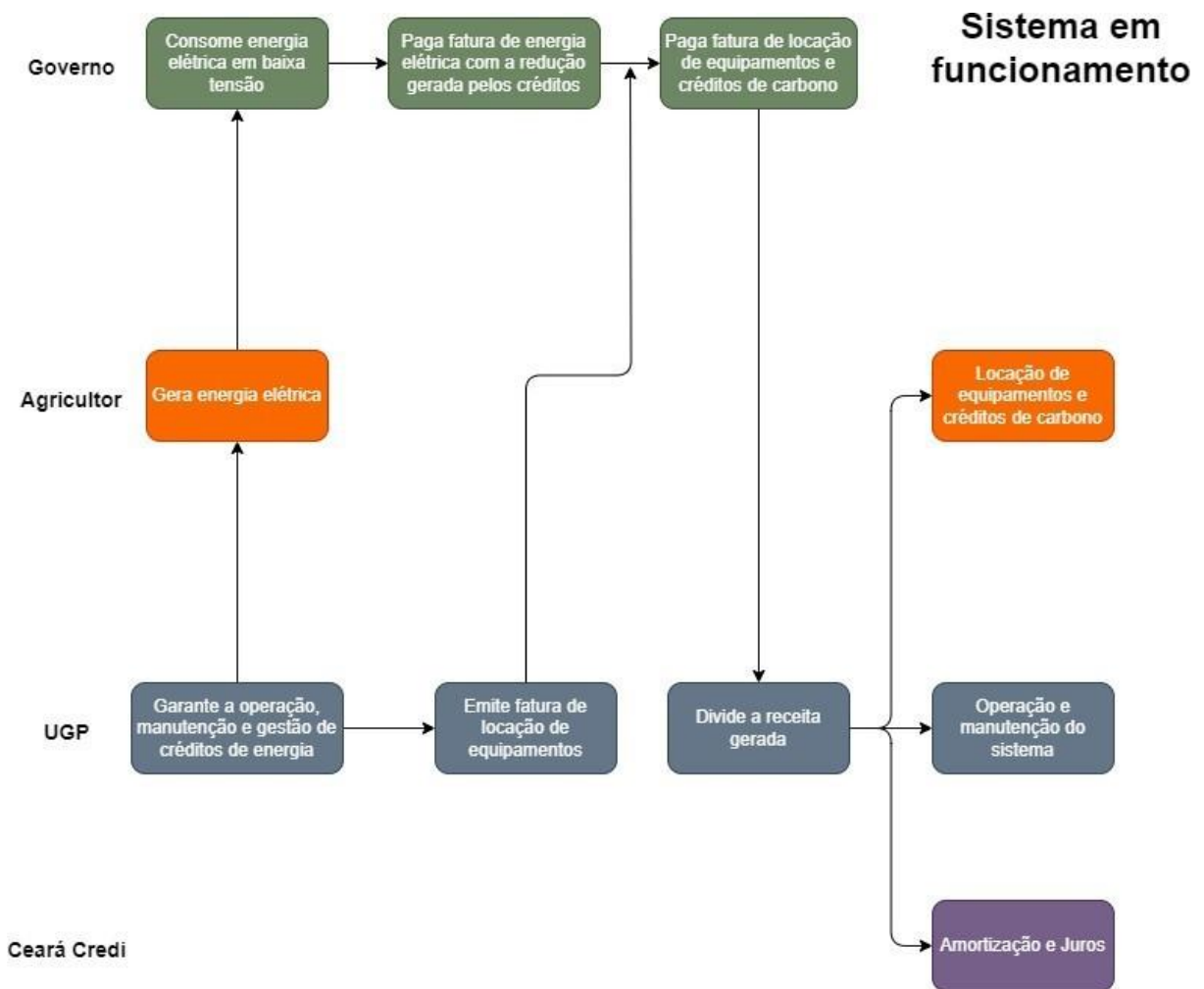
Finalizados os serviços necessários para a implantação do sistema, a UGP fiscaliza boa execução das atividades e, caso não haja nenhum ajuste a ser feito, paga as empresas com o capital do beneficiário obtido por meio do crédito fornecido pelo Ceará Credi.

Após a fase de implantação, uma rotina de atividades será feita mensalmente durante os 20 anos de funcionamento do programa e, concomitantemente, o fim da amortização do crédito. Um fluxograma da fase de funcionamento do programa que deve ser repetida mensalmente é apresentado pela Figura 25.

O sistema solar fotovoltaico instalado, Figura 24, gera energia que terá como beneficiária as unidades consumidoras do governo do estado por meio do Sistema de Compensação de Créditos de Geração Distribuída. Para garantir essa geração, a UGP acautela o SFV por meio dos contratos de manutenção, operação e gestão de créditos da usina.

Mesmo com o uso dos créditos gerados pela usina, as unidades consumidoras do estado pagarão a distribuidora de energia elétrica os custos referentes à distribuição, energia

Figura 23 – Fluxograma de funcionamento do programa após a implantação.



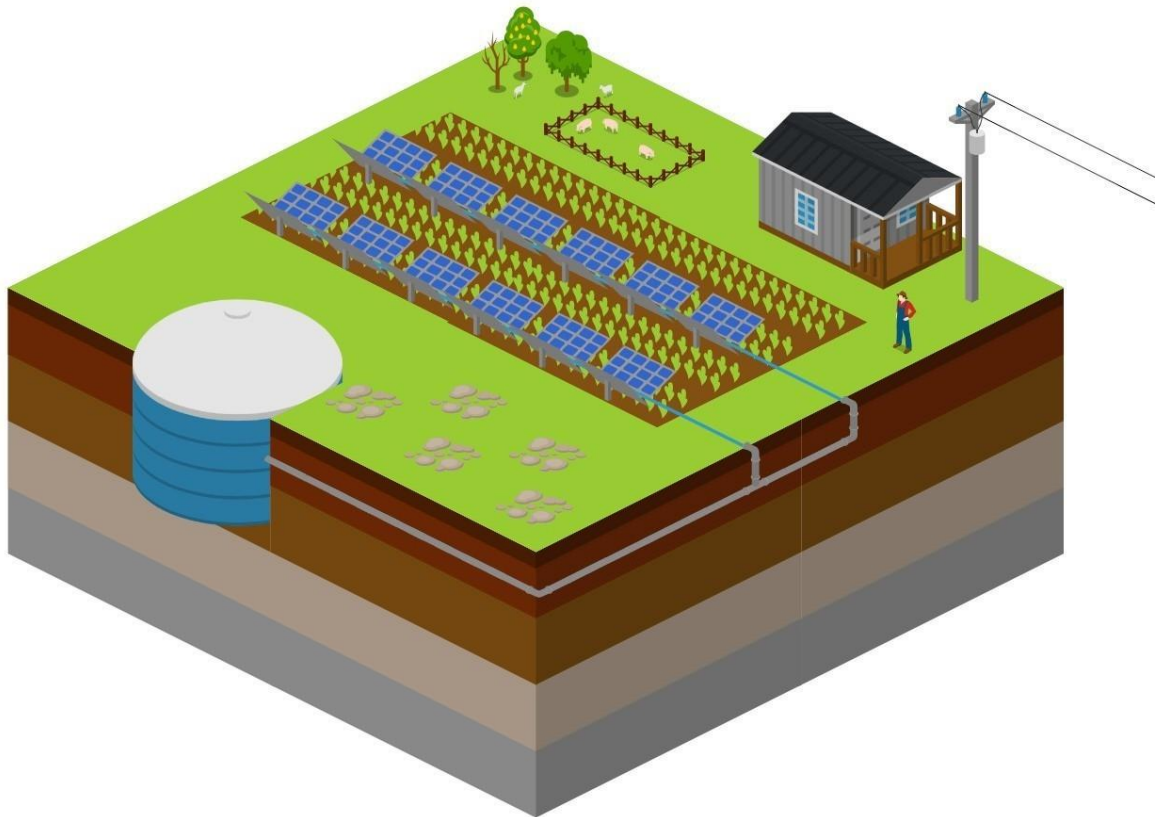
Fonte: O autor.

elétrica e ao custo de disponibilidade, quando aplicável. Considerando que os consumos das unidades consumidoras não variam entre o período anterior e após o projeto, *ceteris paribus*, pode-se afirmar que haverá uma redução nos custos com energia elétrica após a implantação do programa.

Após o pagamento dos débitos com a distribuidora de energia elétrica, a UGP emite uma fatura referente à locação dos equipamentos e dos créditos de carbono. O programa foi dimensionado para que o governo não tenha redução direta de seus custos, haja vista que a fatura de locação de equipamentos e créditos de carbono serão equivalentes à redução lograda com a distribuidora de energia elétrica. Esse fato maximiza o repasse de renda aos beneficiários do programa e o estado mantém seus gastos constantes.

Com a receita obtida pela fatura emitida, a UGP paga a amortização e juros; operação

Figura 24 – Sistema agrivoltaico instalado.



Fonte: O autor.

e manutenção do sistema; e locação de equipamentos e os créditos de carbono. Dessa forma, o crédito emitido para investimento é pago, garantindo a manutenção e operação do sistema e todos os mecanismos envolvidos, bem como geração de renda ao beneficiário do programa via locação de equipamentos e venda dos créditos de carbono (Figura 25).

### 3.2 Simulação do sistema proposto

A simulação do sistema proposto englobará uma análise detalhada dos principais componentes e operações envolvidos, a fim de avaliar sua viabilidade e desempenho. Serão exploradas as interações entre os elementos-chave, como o sistema solar fotovoltaico e sua capacidade de geração elétrica, a produção agrícola, a eficácia do mecanismo de captação de água e a mecanismos para a locação de equipamentos. A análise abrangerá tanto a avaliação individual de cada componente como a integração harmoniosa desses elementos, visando a maximização da eficiência global do sistema proposto.

Nessa seção será adotada como premissa que a unidade beneficiária do projeto é

Figura 25 – Fluxo de energia elétrica e dinheiro do programa.



Fonte: O autor.

composta por quatro pessoas residentes da zona rural de Moraújo, plantam feijão-de-corda e possuem uma renda *per capita* mensal de R\$ 218,00, limite para participar do Programa Bolsa Família (PBF) (SOCIAL, 2023). Assim, a família tem uma renda mensal de R\$ 872,00.

Além disso, adotou-se que a família em questão está situada no município de Moraújo e é participante do PBF, o que lhe proporciona um auxílio de R\$ 696,76, valor médio de repasse do programa na região nordeste do Brasil (BRASIL, 2023). Logo, a renda da família associada com o benefício do PBF, é de R\$ 1.472 ao mês.

Sabe-se que o valor para linha de pobreza definido pelo Banco Mundial (IJSN, 2023) é de US\$6,85. Esse valor convertido pela Paridade de Poder de Compra (PPC/2017), que é um método alternativo à taxa de câmbio e leva em conta o valor demandado para adquirir a mesma quantidade de bens e serviços no mercado interno de cada nação, em comparação com o mercado norte-americano, resulta em um montante de R\$ 665,02 por mês. Assim, tem-se que a renda familiar mensal mínima para sair da faixa de pobreza deve ser superior a R\$ 2.660,08 reais.

Assim, objetivando garantir uma renda familiar mínima de R\$ 2.800 reais, valor que garante a superação da linha da pobreza definida pelo Banco Mundial, nota-se que seria necessário que o programa proposto nesse estudo gerasse uma renda mínima mensal de R\$ 1.271,24 reais. Dessa maneira, associado com a renda da família e o PBF, seria possível atingir o patamar de R\$ 700 reais *per capita*.

Para atingir tal objetivo, adotou-se a implantação de uma usina agrivoltaica de 88



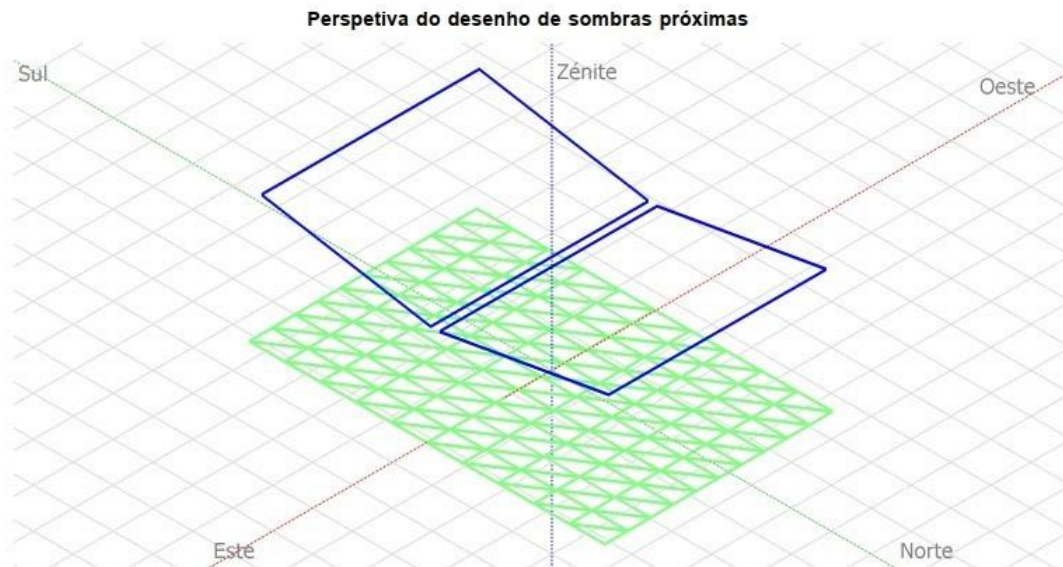
kW. Essa usina será composta por 10 módulos de 8,8 kW com a configuração definida na seção anterior. O sistema ocupará uma área de 770,30 m<sup>2</sup>, já considerando um espaçamento entre os módulos.

### 3.2.1 Sistema solar fotovoltaico

Após a definição dos equipamentos do sistema fez-se uma simulação com apoio do *software* PVsyst. No programa foi implementado exatamente o sistema definido e simulado na localização de Moraújo. O sistema foi direcionado ao norte com inclinação convergente, conforme a Figura 26.

Figura 26 – Modelagem do arranjo fotovoltaico no PVsyst.

Parâmetros principais do sistema	Tipo de sistema	Building system	
<b>Sombras próximas</b>	Sombras lineares		
Orientação do plano dos módulos	2 orientações	Inclinação/Azimute = 10°/0° e 10°/-180°	
Módulos FV	Modelo	LR4-72 HIH 440 M	Pnom 440 Wp
Grupo FV	Número de módulos	20	Pnom total <b>8.80 kWp</b>
Inversor	Modelo	QS1	Pnom 1200 W ac
Bateria de inversores	Número de unidades	6.0	Pnom total <b>7.20 kW ac</b>
Exigências do consumidor	Carga ilimitada (rede)		



Fonte: O autor.

Assim, a expectativa de geração do sistema na localização simulada é de 13.698 MWh/ano e o quociente de performance anual do sistema é de 0,772, conforme a Tabela 4.



Tabela 4 – Dados de irradiação global, energia injetada e quociente de performance do sistema simulado.

Mês	Irradiação global horizontal (kWh/m <sup>2</sup> )	Energia Injetada na rede (MWh)	Quociente de performance
Janeiro	165,0	1,109	0,770
Fevereiro	143,8	0,970	0,773
Março	145,1	0,974	0,770
Abril	136,1	0,923	0,778
Maio	156,3	1,058	0,776
Junho	149,8	1,024	0,782
Junho	176,4	1,198	0,777
Agosto	192,0	1,300	0,774
Setembro	187,1	1,253	0,767
Outubro	200,8	1,345	0,766
Novembro	190,7	1,282	0,769
Dezembro	188,2	1,262	0,768
<b>Ano</b>	<b>2031,3</b>	<b>13,698</b>	<b>0,772</b>

Fonte: O autor.

Nota-se, pela Figura 27, que, graças ao design do sistema, há uma perda de 0,29% com sombreamento. Essa perda não é significativa e o design com módulos com inclinações convergentes traz outros benefícios por possibilitar a captação da água da chuva.

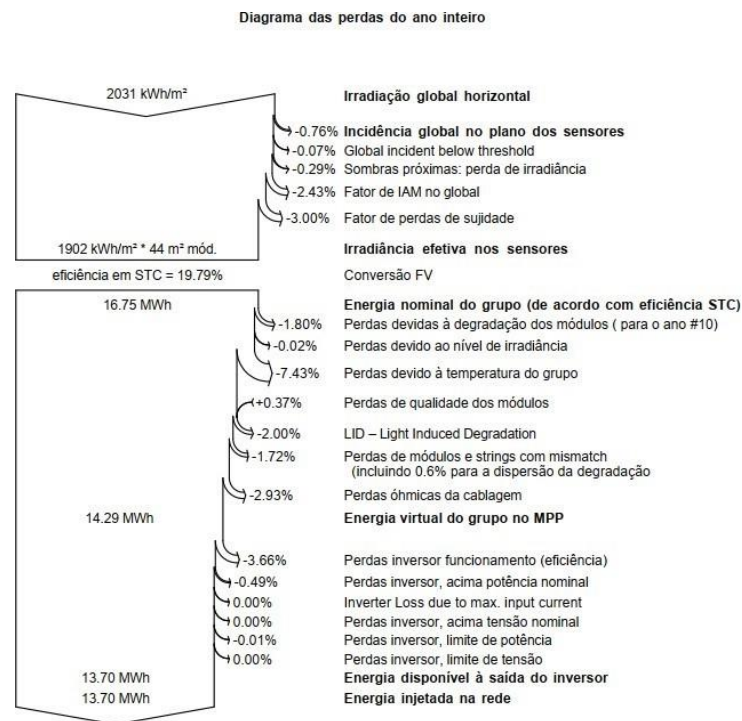
### 3.2.2 Estimativa de produção agrícola

Considerando que o feijão-de-corda tem uma produtividade média de 295 kg/ha e um preço médio de R\$ 4,86/kg em 2021, calcula-se que a área de 770,30 m<sup>2</sup> poderia produzir 22,72 kg de feijão e gerar uma receita de R\$ 110,43. Esse valor corresponde a 12,6% da renda familiar e pode ser usado para consumo ou venda.

### 3.2.3 Captação de água

Considerando que o sistema ocupa uma área de 592,54 m<sup>2</sup>, que permite a captação de água, calculou-se o volume de água que pode ser captado, considerando a precipitação média

Figura 27 – Diagrama de perdas do sistema modelado.



Fonte: O autor.

da região. Para o município de Moraújo será possível captar 410.037 litros de água ao longo de um ano, já que o município tem uma precipitação anual média de 692 mm.

Vale ressaltar que, apesar da evapotranspiração do município ser de 1.982 mm, superior à média estadual de 1845,40 mm, essa questão não será um problema, uma vez que o reservatório será subterrâneo e evitará a evaporação.

Todavia, é importante ressaltar que somente a água captada será suficiente para suprir 43,4% a demanda de consumo da família, bem como a demanda para irrigação da cultura. Isso se dá a medida que o consumo anual residencial de água é, em média, 102.200 litros de água para uma casa com 4 residentes e o consumo para a irrigação de 770,30 m<sup>2</sup> é de 843.478 litros por ano.

### 3.2.4 Análise financeira

Para a avaliação financeira, adotou-se como premissa a tarifa homologada pela Resolução Homologatória ANEEL n.º 3.185/2023. Além disso, adotou-se que alíquota de PIS/COFINS seria de 9,25% e a de ICMS 0%, uma vez que as unidades consumidoras pertencentes a subclasse “Poder Público Estadual” são isentas. Dessa forma, obteve-se uma tarifa de energia

elétrica de R\$ 0,819537/kWh, conforme apresentado da Tabela 5.

Tabela 5 – Premissas de tarifa de energia adotada.

<b>Tarifa homologada</b>	
Distribuidora	<b>ENEL CE</b>
Tarifa de Energia (TE) (R\$/kWh)	0,298820
TUSD (R\$/kWh)	0,444910
TE+TUSD (R\$/kWh)	0,743730
TUSD FIO B	0,283150
<b>Alíquotas dos impostos</b>	
PIS/CONFINS	9,25%
ICMS	0%
<b>Tarifa com impostos</b>	
TE+TUSD (R\$/kWh)	0,819537

Fonte: O autor.

O valor de Capital Expenditure - Despesas de Capital (CAPEX) foi calculado por meio de valores apresentados pela pesquisa de mercado realizada pela empresa Greener, onde o valor médio de implantação de um sistema de 100 kWp instalado em solo seria de R\$ 4,58/Wp (GREENER, 2023). Todavia, como se trata de um sistema agrivoltaico e este tem um custo 38% superior aos sistemas tradicionais, o valor de CAPEX adotado foi de R\$ 6,04/Wp.

Já para receita, além da locação de equipamentos, foi considerado a venda de créditos de carbono. No Brasil, esse mercado ainda não é regulado, e o mercado vigente é apenas o voluntário. Assim, para valorar quando custaria no mercado uma tonelada de CO<sub>2</sub>, adotou-se o valor médio de 2019 a 2023 do índice Crédito Carbono Futuros (CFI2Z3), listado na Bolsa de Valores. Dessa forma, obteve-se que uma tonelada de carbono seria equivalente a R\$ 290,9 reais.

Ademais, é importante ressaltar que se adotou uma taxa de conversão de 0,09 kg de CO<sub>2</sub>/kWh. Esse valor foi calculado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e publicado em seu inventário corporativo (CIÊNCIA, 2023).

Por fim, é importante ressaltar que, para essa análise financeira, não há senso avaliar parâmetros e indicadores de sucesso, como *Payback*, VPL - Valor presente líquido e TIR - Taxa interna de retorno, uma vez que não há investimento por parte do beneficiário e o fluxo de caixa é sempre positivo.

#### 3.2.4.1 Parâmetros da usina

Já para os valores de Operational Expenditure - Despesas Operacionais (OPEX), onde se engloba toda a operação e manutenção do sistema, bem como a gestão dos créditos gerados, adotou-se uma estimativa de 2,70% por ano do valor de CAPEX.

Para os parâmetros de financiamento tomou-se que a alavancagem do projeto seria de 100%, uma vez que o beneficiário não teria condições de fazer o investimento com o capital próprio. Já o valor dos juros adotado foi de 6% (valor 50% inferior às condições de financiamento ofertado pelo BNDES em suas linhas de financiamentos para projetos de usinas fotovoltaicas (BNDES, 2023)), uma vez que a fonte de recurso será, preferencialmente, originária de subvenção. Por fim, o sistema de amortização adotou-se o SAC (Sistema de Amortização Constante).

Considerou-se que o módulo fotovoltaico tem uma perda de produtividade de 2,5% no primeiro ano e 0,5% nos demais anos, conforme disposto no *datasheet* do equipamento adotado. O fator de *overload* do inversor adotado foi de 25%.

Por fim, estabeleceu-se que a usina seria implantada no ano de 2023. Essa premissa gera como consequência a necessidade de aplicação da regra de transição de aplicação da TUSD, conforme definido na Lei 14.300/22.

#### 3.2.4.2 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa representará a união de todas as entradas e saídas relativas ao projeto. A Tabela 6 resume o modelo aplicado. Porém, é importante caracterizar adequadamente as etapas consideradas. Dentre elas:

- Receita Bruta: O valor da locação dos equipamentos e a venda de créditos de carbono constituem esta etapa. Considera-se que os valores sofrerão um reajuste anual, superior à inflação, assim como ocorre, normalmente, com a tarifa da distribuidora. No modelo, utilizou-se uma elevação anual de 6%;
- Despesas Anuais: O OPEX constitui essa etapa. Considera-se um gasto anual de R\$ 14.361 para gestão, operação e manutenção do ativo. A soma da receita bruta e das despesas anuais resultará no Lucro antes dos juros e tributos (EBITDA). Os custos de OPEX seguem as variações anuais do Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA);
- Impostos: Para o modelo que seria o Lucro Real, a qual é aplicável a médias e grandes empresas;

- Financiamento: O resultado do financiamento será analisado como possível estratégia. Sua influência será a aquisição do endividamento no período inicial e as prestações ao longo dos 20 anos de contrato; e
- Investimentos: O CAPEX (pré-construção, construção, gastos em projetos e estudos) e a troca dos inversores no décimo ano de funcionamento da usina a um custo de R\$ 3 reais por Wp. Essa troca é prevista uma vez que a garantia dos inversores se encerra, em sua maioria, após o decênio.

Tabela 6 – Parâmetros do fluxo de caixa

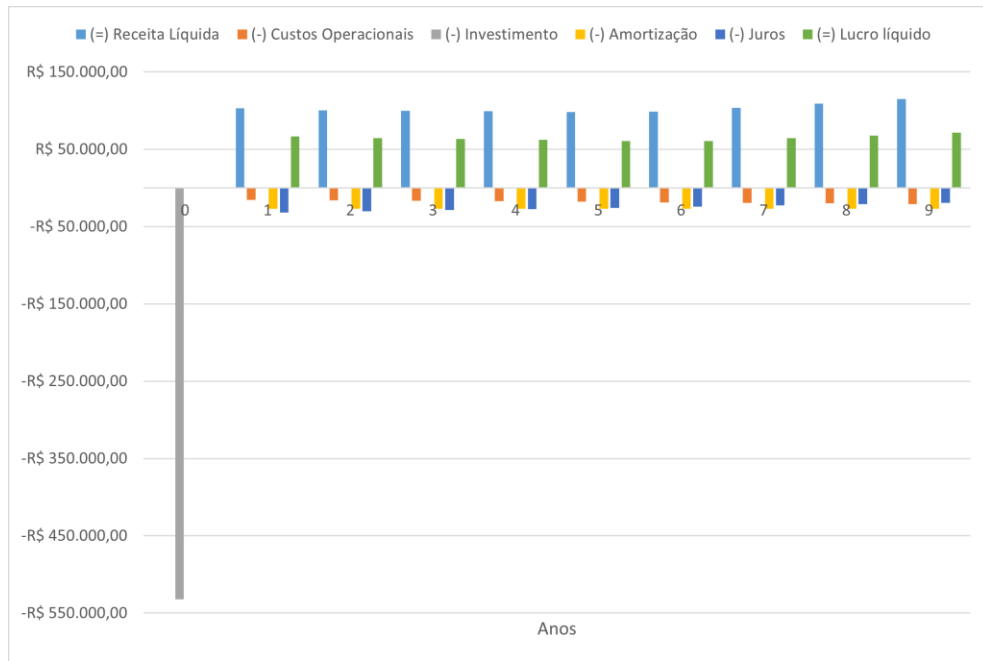
<b>Fluxo de Caixa</b>	
<b>(+) Receita Bruta</b>	<i>i. Locação dos equipamentos (Fixa)</i> <i>ii. Créditos de Carbono (Variável)</i>
<b>(-) Tributos sobre a venda</b>	<i>i. ISS, PIS, CONFINS</i>
<b>(-) Despesas Anuais</b>	<i>i. OPEX</i> <i>ii. Gestão de Créditos</i>
<b>(=) EBITDA</b>	
<b>(-) Juros</b>	<i>*Considerar apenas em caso de financiamento</i>
<b>(-) Amortização</b>	
<b>(-) Tributos sobre o lucro</b>	<i>i. Lucro real</i>
<b>(=) Lucro líquido</b>	
<b>(-) Investimentos</b>	<i>i. Investimento inicial (CAPEX)</i> <i>ii. Troca de inversores (ano 10)</i>
<b>(+) Liberação de financiamento</b>	<i>*Considerar apenas em caso de financiamento</i>
<b>(=) Fluxo de caixa final</b>	

Fonte: O autor.

Para análise detalhada do fluxo de caixa, segmentou-se em duas partes: ano 0 ao ano 9 e ano 10 ao ano 21. Observando a Figura 28, onde é apresentado o fluxo de caixa dos 9 primeiros anos da usina, nota-se o investimento inicial para a implantação da usina no ano 0, mas, já no ano 1, há receita suficiente para suprir as necessidades dos custos operacionais, pagar a amortização e juros do investimento inicial e, ainda assim, gerar lucro.

Já na Figura 29, onde é representado do ano 10 ao 21, nota-se a realização de um

Figura 28 – Fluxo de caixa do ano 0 ao ano 9



Fonte: O autor.

novo investimento. Este investimento é para custear a troca dos inversores no momento da finalização de sua garantia por parte dos fabricantes.

Figura 29 – Fluxo de caixa do ano 10 ao ano 21



Fonte: O autor.

Além disso, nota-se que no vigésimo ano é realizado o último pagamento referente à amortização do investimento, e os juros vieram numa sequência decrescente iniciada no ano 0 e finalizada no ano 20. Assim, no ano 21, o único elemento que reduz a receita bruta são os custos

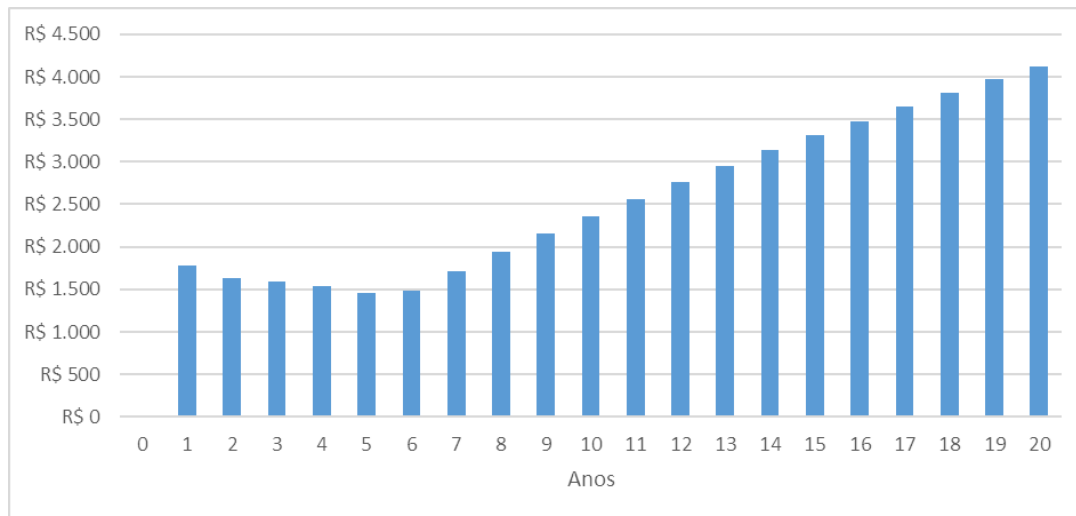
operacionais.

### 3.2.4.3 Receita familiar

A receita familiar é proveniente dos ganhos com a locação de equipamentos e a venda dos créditos de carbono. O valor referente à locação de equipamentos é fixo ao longo de um ano, com o seu valor reajustado acima do IPCA na transição de ano. Já o valor de créditos de carbono, por ser diretamente associado com a produtividade da usina, é uma parcela variável mensalmente.

A Figura 30 apresenta a variação da renda familiar média mensal ao longo os 20 anos de funcionamento do programa.

Figura 30 – Ganho mensal médio familiar.



Fonte: O autor.

Com as duas fontes de renda somadas tem-se que a renda mensal tem o seu valor mínimo (R\$ 1.345 reais) no sexto ano de funcionamento da usina, haja vista que coincidirá com término do período de transição de aplicação da TUSD.

Nota-se, também, que após o sexto ano de funcionamento da usina há um crescimento expressivo da renda para o beneficiário do programa. Essa situação se dá, pois, a tarifa de energia é reajustada, historicamente, por um valor superior à inflação e isso implica que a receita torna-se, expressivamente, superior aos custos de OPEX.

#### 3.2.4.4 *Expansão do programa*

Sabendo que o foco é atender o consumo do governo estadual, é importante analisar o potencial de expansão do programa. O governo estadual consome em média 62,7 GWh/Ano, com suas unidades consumidoras atendidas em baixa tensão, desse montante 41,8 GWh/Ano é consumido pela administração indireta estadual.

Assim, limitando pelo consumo estadual, seria possível expandir o programa para executar 494 projetos para atender pessoas em situação de pobreza.

Para essa expansão do projeto, estima-se que seria necessário um investimento inicial total de R\$ 262,7 milhões de reais.



#### 4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O arranjo do sistema modular proposto, com capacidade de 8,8 kWp, foi inspirado no projeto APV-MaGa da Associação Fraunhofer. Esse arranjo apresenta uma inclinação convergente dos módulos fotovoltaicos, permitindo tanto a geração de energia solar quanto a captação de água. Os componentes selecionados incluem módulos fotovoltaicos monocristalinos PERC Half cell Bifacial de 445 Wp da Longi, associados a microinversores APsystems de 1,20 kW. A estrutura de suporte foi projetada para acomodar 20 módulos fotovoltaicos, dispostos a uma inclinação de 10°, com capacidade para acumular água para uso na irrigação dos cultivos. A simulação realizada pelo *software* PVsyst estima uma produção anual de 13,698 MWh, minimamente afetada por sombreamentos, e destaca os benefícios adicionais provenientes do design convergente dos painéis solares, que facilita a captação de água pluvial.

O sistema proposto de captação de água possui uma configuração de inclinação convergente que possibilita a coleta de água. Composto por calhas em PVC de alta densidade, esse sistema direciona a água capturada para um reservatório central, a partir do qual pode ser distribuída para irrigação de cultivos.

A seleção das áreas de implementação do projeto envolve a avaliação de diversos critérios, sendo que a utilização de métodos de tomada de decisão multicritério, como o Método AHP TOPSIS 2N, pode proporcionar apoio nesse processo.

A adoção do sistema agrivoltaico sugerido oferece uma gama de vantagens socioeconômicas e ambientais. A geração de energia renovável através dos painéis solares pode resultar na diminuição da dependência de fontes energéticas não renováveis, contribuindo para a atenuação das mudanças climáticas. Além disso, a captação de água pluvial se apresenta como alternativa sustentável para a irrigação agrícola, particularmente em locais com disponibilidade hídrica limitada.

A implementação do sistema agrivoltaico em Jaguaribara revelou-se viável devido às favoráveis condições climáticas da região, com uma elevada média de irradiação solar anual. A instalação de um sistema de 88 kWp nessa localização foi estimada em R\$ 531.520, considerando um custo de R\$ 6,04/Wp, com foco na tecnologia agrivoltaica.

A análise financeira demonstrou que o programa apresenta um fluxo de caixa positivo desde o primeiro ano de operação. Assim, a partir do início das atividades, as receitas provenientes da locação dos equipamentos e da venda de créditos de carbono não apenas suprimem os custos operacionais e financeiros, mas também geram lucro. Essa viabilidade econômica é

sustentada ao longo dos anos, mesmo após considerar investimentos futuros, como a substituição dos inversores.

A abordagem também impacta positivamente a renda familiar das pessoas em situação de pobreza. A combinação das receitas advindas da locação dos equipamentos e da comercialização de créditos de carbono resulta em um incremento gradual da renda familiar durante os 20 anos de operação. Esse aumento não apenas alivia o contexto financeiro das famílias, mas também concorre para o aprimoramento de sua qualidade de vida.

Ademais, a análise de expansão do programa indica potencial para atender mais de 400 famílias em situação de pobreza no estado. A capacidade de geração fotovoltaica poderia ser direcionada para atender às demandas governamentais, liberando recursos para serem investidos em outros setores e programas sociais.

Em síntese, o programa de geração fotovoltaica em áreas rurais para atender indivíduos em situação de pobreza evidencia um horizonte promissor. Não apenas contribui para a obtenção de energia limpa e sustentável, mas também impacta positivamente as finanças familiares, contribuindo para a redução da desigualdade, recuperação de áreas suscetíveis a desertificação e a melhoria das condições de vida nas comunidades rurais. Adicionalmente, o potencial de expansão do programa sugere que os benefícios poderiam ser estendidos a um número ainda maior de pessoas em situação de vulnerabilidade.

#### **4.1 Recomendações de trabalhos futuros**

Recomenda-se a continuação da pesquisa sobre a viabilidade técnico-econômica de sistemas agrivoltaicos em diversas regiões. A exploração das variações climáticas, padrões de radiação solar e custos locais possibilitaria uma análise mais aprofundada dos benefícios específicos e desafios associados à implementação em contextos variados.

Propõe-se a realização de estudos de otimização do design de sistemas agrivoltaicos com foco na captação de água. A investigação abrangeria diferentes ângulos de inclinação, materiais de captação e técnicas de armazenamento, visando aprimorar a eficiência na autossuficiência hídrica nas áreas agrícolas.

É recomendada a avaliação abrangente dos impactos sociais e ambientais provenientes de programas de geração de energia agrivoltaica. Essa avaliação contemplaria indicadores socioeconômicos, como a melhoria da qualidade de vida e a geração de emprego local, e também examinaria o potencial de redução das emissões de carbono e o uso sustentável dos recursos

hídricos.

Propõe-se a exploração de modelos de financiamento inovadores e parcerias público-privadas para viabilizar a implementação de projetos agrivoltaicos. Essa abordagem envolveria o estabelecimento de modelos de negócios incentivadores para investidores, governos e comunidades locais colaborarem no desenvolvimento desses sistemas.

Recomenda-se investigar a integração de sistemas agrivoltaicos com redes elétricas inteligentes (*smart grids*) para aprimorar a gestão da geração e consumo de energia. Esse estudo exploraria estratégias de controle, armazenamento de energia e intercâmbio de energia com a rede, visando otimizar a operação e maximizar os benefícios.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASIL. **Bolsa Família paga valor extra e benefício é o maior da história. Brasil, 2023.** Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-06/bolsa-familia-paga-valor-extra-e-beneficio-e-o-maior-da-historia>. Acesso em: 20 de agosto de 2023.
- AGOSTINI, Alessandro et al. **Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment.** Elsevier, v. 281, p. 116102, Itália, 2021.
- AGT. AGRI-PHOTOVOLTAIK. Alemanha, 2021. Disponível em: <https://tubesolar.de/agri-photovoltaik/>. Acesso em 12 de junho de 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Infográfico do mercado solar no Brasil.** São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 09 de outubro 2022.
- BAE, Joon-Hak et al. **Analysis on the features of noct andnnot tests with photovoltaic module.** IEEE Access, v. 8, n. 1, p. 151546–151554, EUA, 2020.
- BARNOSKY, Anthony D. et al. **Has the earth’s sixth mass extinction already arrived?** Nature, v. 471, n. 7336, p. 51–57, Inglaterra, 2011.
- BELLARD et al. **Impacts of climate change on the future of biodiversity.** Ecology letters v. 15, n. 4, p. 365–377, França, 2012.
- BNDES. **TFB: Taxa fixa do BNDES.** Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tfb-taxa-fixa-bndes>. Acesso em: 10 de fevereiro 2023.
- CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS et al. **Atlas Eólico e Solar: Ceará.** [S. l.]: Camargo Schubert; ADECE; FIEC; SEBRAE, Brasil, 2019. 98-99 p. (A881). ISBN 978-85-67342-05-4.
- CARDOSO, M. J. et al. **Feijão-caupi: Recomendações técnicas para cultivo.** Embrapa, v. 1, n. 1, p. 1–4, 2000. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/126277/1/Feijao-caupi.pdf>. Acesso em: 15 de março de 2022.
- CAVALCANTI, E. R. **Vulnerabilidade de comunidades rurais diante da variabilidade climática no semiárido pernambucano: Perspectiva de governança adaptativa dos recursos hídricos.** Universidade Federal de Pernambuco. Brasil, 2015.
- CAVALCANTI, E. R., et al. **Projeto piloto de sistema agrivoltaico em plantação de abacaxi em Pernambuco.** 2019. Disponível em: <https://site.ipa.br/noticias/pe-recebra-o-1o-sistema-agrovoltaico-em-operacao-no-brasil/>. Acesso em: 09 de setembro de 2022. Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará. PAE-CE. Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.mpce.mp.br/wp-content/uploads/2016/05/PROGRAMA-ESTADUAL-DE-COMBATE-A-DESERTIFICA%C3%87%C3%83O.pdf>. Acesso em: 18 de novembro de 2022.

BRASIL. Casa Civil. **Brasil reduz a extrema pobreza, segundo estudos do Banco Mundial**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2022/novembro/brasil-reduz-a-extrema-pobreza-segundo-estudos-do-banco-mundial>. Acesso em: 22 de agosto de 2023.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Fator médio: Inventários corporativos**. Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 22 de agosto de 2023.

Commission, I. E. et al. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (pv) modules—design qualification and type approval. CEI/IEC, v. 61215, 2005.

COSTA, André. **Desertificação avança no território cearense, alertam especialistas**. Diário do Nordeste, Ceará, 05 de abril de 2020. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/desertificacao-avanca-no-territorio-cearense-alertam-especialistas-1.2230739>. Acesso em: 12 de junho de 2022.

COUTURE et al. **An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment**. Elsevier, v. 38, n. 2, p. 955–965, 2010.

DINESH et al. **The potential of agrivoltaic systems**. Elsevier, v. 54, p. 299–308, EUA, 2016.  
 NAVES, José Eduardo. Qual é a diferença dos módulos solares convencionais e os módulos Half Cell? São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.seunipro.com/qual-e-a-diferenca-dos-modulos-solares-convencionais-e-os-modulos-half-cell/>. Acesso em: 22 de novembro de 2022.

IBGE. **Produção de Feijão no Ceará em 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/feijao/ce>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2022.

FAO. **FAO: produção agrícola deve dobrar para evitar a fome**. 2010. Disponível em: <https://g1.globo.com/brasil/noticia/2010/07/fao-producao-agricola-deve-dobrar-para-evitar-a-fome.html>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2022.

FERREIRA, L. G. R. **Fisiologia vegetal: relações hídricas**. [S. l.]: Universidade Federal do Ceará, Brasil, 1988.

FREIRE FILHO, F. R. et al. **Colheita, beneficiamento e acondicionamento: Cultivo de feijão-caupi**. 2. ed., p. 1-6, Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. Disponível em: [https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemasdeproducao16\\_1gal1ceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=9109&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicoId=10511](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao16_1gal1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=9109&p_r_p_-996514994_topicoId=10511). Acesso em: 19 de fevereiro de 2022.

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT. **From idea to implementation**. Alemanha, 2022. Disponível em: <https://agri-pv.org/en/the-concept/from-idea-to-implementation/>. Acesso em: 18 de novembro de 2022.

FUNCEME. **Seca e desertificação no estado do Ceará**: Fórum cearense de mudanças climáticas, biodiversidade e combate a desertificação. Ceará, 2022. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/36/2022/05/Apresentacao-Funceme-8a-Reuniao-do-FCMC.pdf>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2022.

GIULIO, G. M. D. et al. **Plano nacional de adaptação à mudança do clima**: Possibilidades e desafios. *Jornal da Ciência*, v. 24, n. 1, p. 1, Brasil, 2016.

GOMES, L. et al. **Tomada de decisão gerencial**: enfoque multicritério. Rio de Janeiro: Editora Atlas, Brasil, 2002.

GONOCRUZ, R. A. et al. **Analysis of the rice yield under an agrivoltaic system**: A case study in japan. *Environments*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 7, p. 65, EUA, 2021.

GREENER. **Estudo Estratégico**: geração distribuída 2023. 2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-2-semester/>. Acesso em: 22 de agosto de 2023.

HANIFI, H. et al. **Reduced shading effect on half-cell modules**: measurement and simulation. Trabalho apresentado no 31º European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. EUA, 2015. p. 2529–2533.

HARVEY, M. et al. **Combining solar power with fruit production**. *Farm Policy Journal*, v. 17, n. 3, p. 21–30, EUA, 2020.

IBGE. **Produção agrícola municipal 2007**. 2008. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/pesquisa/31/29644tipo=ranking&ano=2007&indicador=2964>. Acesso em: 12/ de junho de 2022.

IBGE. **Indicadores IBGE**: pesquisa nacional por amostra de domicílios contínua [mensal]. Rio de Janeiro, 2015.

IJSN. **Dez milhões saíram da pobreza no Brasil em 2022**. 2023. Disponível em: <https://ijsn.es.gov.br/noticias/dez-milhoes-sairam-da-pobreza-no-brasil-em-2022#:~:text=No%20entanto%2C%20o%20n%C3%BAmero%20de%20condi%C3%A7%C3%B5es%20de%20mis%C3%A9ria%2C%20em%202022>. Acesso em: 20 de julho de 2023.

IPECE. **Análise espacial da extrema pobreza no Estado do Ceará**. Ceará, 2013. Disponível em: [https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/05/ANALISE\\_ESPACIAL\\_DA\\_EXTREMA\\_POBREZA\\_NO\\_ESTADO\\_DO\\_CEARA.pdf](https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/05/ANALISE_ESPACIAL_DA_EXTREMA_POBREZA_NO_ESTADO_DO_CEARA.pdf). Acesso em: 22 de julho de 2023.

IRIE, N. et al. **Sector-wide social impact scoping of agrivoltaic systems**: A case study in japan. *Elsevier*, v. 139, p. 1463–1476, EUA, 2019.

ISLAM, S. S. et al. **An agrivoltaic system for improvement of land use efficiency and crop productivity**. *Elsevier*, v. 131, p. 1044–1054, EUA, 2019.

LAGUARTA, G. et al. **Agrophotovoltaics**: Crop productivity and electricity generation under

diffuse light. Elsevier, v. 139, p. 720–732, EUA, 2019.

LALEMAN, R. et al. **Life cycle analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic systems in regions with a low solar irradiation.** Elsevier, v. 15, n. 1, p. 267–281, EUA, 2011.

LI, C. et al. **The economic and social performance of integrated photovoltaic and agricultural greenhouses systems: Case study in China.** Elsevier, v. 190, p. 204–212, 2017.

MAHMOOD, K. et al. **Review on technological advancements, economic feasibility, and environmental implications of agrivoltaic systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 127, p. 1050-1066, 2020.

MAJUMDAR, D. et al. **Analysis of land availability for utility-scale power plants and assessment of solar photovoltaic development in the state of Arizona, USA.** Renewable Energy, v. 134, p. 1213–1231, 2019.

MAMUN, M. A. A. et al. **Review of research on agrivoltaic systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 161, 2022. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.11235>. Acesso em: 205 de setembro de 2023.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants 2nd edn.** Institute of Plant Nutrition University of Hohenheim: Germany, 1995.

MILLS, J. N. et al. **Potential influence of climate change on vector-borne and zoonotic diseases: a review and proposed research plan.** Environmental health perspectives, National Institute of Environmental Health Sciences, v. 118, n. 11, p.1507–1514, 2010.

MOLENBROEK, E. et al. **Hot spot susceptibility and testing of PV modules.** In: LAS VEGAS. Photovoltaic Specialists Conference. [S. l.], 1991. v. 1, p. 547–552.

MULHERN, O. **Agrophotovoltaics: The Benefits of Solar Agriculture.** 2020. Disponível em: [https://earth.org/data\\_visualization/agrophotovoltaics-the-benefits-of-solar-agriculture/](https://earth.org/data_visualization/agrophotovoltaics-the-benefits-of-solar-agriculture/). Acesso em: 02 de abril de 2022.

MULLER, M. et al. **Evaluating the iec 61215 ed. 3 NMOT procedure against the existing NOCT procedure with pv modules in a side-by-side configuration.** Trabalho apresentado em: 38° IEEE Photovoltaic Specialists Conference. [S. l.], 2012. p. 000697–000702.

DORANTE, Adriana. **Até 2050, é possível que a fonte solar seja responsável por quase metade da capacidade de produção de energia elétrica brasileira.** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/ate-2050-e-possivel-que-a-fonte-solar-seja-responsavel-por-quase-metade-da-capacidade-de-producao-de-e.html>. Acesso em: 12 de junho de 2022.

O'CALLAGHAN, T. **Biosphere 2**: The world within a world. Inglaterra, New Scientist, v. 219, n. 2927, p. 41– 45, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262407913618825>. Acesso em: 21 de junho 2023.

PINHO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. [S. l.]: CEPTEL: CRESESB, 2014. v. 1.

PREISER, K. **IEC 61853-2**: Photovoltaic (PV) Module Performance Testing and Energy Rating (Spectral Responsivity, Incidence Angle and Module Operating Temperature Measurements). Edition 1.0. [S. l.]: IEC, 2016. v. 1.

REYNOLDS, J. F. et al. **Global desertification: building a science for dryland development**. Science, v. 316, n. 5826, p. 847– 851, 2007.

RODRIGUES, B. D. et al. **Uma análise sobre as chuvas no ceará baseada nos eventos de El Niño, La Niña e no dipolo do Servain durante a estação chuvosa**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 28, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.76238>. Acesso em: 21 de junho 2023.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos**. [S. l.]: Editora UFSC: LABSOLAR, 2004.

SÁ, I. et al. **Zoneamento das áreas suscetíveis à desertificação do estado de Pernambuco**. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco - Sudene, 2020.

SAATY, Thomas et al. **When is a decision-making method trustworthy? Criteria for evaluating multi-criteria decision-making methods**. International Journal of Information Technology & Decision Making, v. 14, n. 6, p. 1171–1187, China, 2015.

SALISBURY, F. B. et al. **Plant physiology**: Books in the wadsworth biology series International student Editions, Wadsworth Publishing Company, Belmont, California- USA, 1992.

SANTANA, M. O. et al. **Atlas das áreas suscetíveis à desertificação do Brasil**. Brasília: MMA, 2007.

SCHINDELE, S. et al. **Implementation of agrophotovoltaics**: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. Applied Energy, Elsevier, v. 265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>. Acesso em: 09 de fevereiro de 2021

SHUKLA, P. R. et al. **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Cambridge University Press, Cambridge-Reino Unido, 2019.

SILVA, Enid Rocha Andrade da. Agenda 2030: **ODS-metas nacionais dos objetivos de desenvolvimento sustentável**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea). Brasil, 2018.



SILVA, Priscila Lemes de Azevedo **Biodiversidade e mudanças climáticas no Brasil: Levantamento e sistematização de referências**. WWF Brasil (Relatório). Brasília, 2018.

SILVA, R. A. et al. **Estudo da variabilidade da radiação solar no nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Brazilian Society of Agricultural and Environmental Engineering, p. 2–4, 2010.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome. **Bolsa Família**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mds/pt-br/acoes-e-programas/bolsa-familia>. Acesso em: 20 de agosto de 2023.

SOUZA, L. et al. **Implementation of new hybrid AHP-TOPSIS-2N method in sorting and prioritizing of an it CAPEX project portfolio**. International Journal of Information Technology & Decision Making, vol. 17, nº. 04, p. 977-1005, 2018.

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT. **Agrophotovoltaics: Resource-efficient land use system**. Alemanha, 2023. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/apv-maga.html>. Acesso em: 20 de agosto de 2023.

SÁ, I. B. et al. **Desertificação de áreas agrícolas no semiárido brasileiro**. In: UFERSA: Anais do I Simpósio sobre Manejo de Plantas Daninhas do Semiárido. Mossoró-RN, 2007.p. 53– 68.

TAIZ et al. **Plant Physiology**. [S. l.]: Sinauer Associates Publishers, Sunderland, Massachusetts, 1998. v. 2.

THORNTHWAITE, C. W. **Climate and settlement in the great plains**. Yearbook of Agriculture, US Government Printing Office, v. 7947, p. 177–187, 1941.

WANG, D. et al. **Analysis of light environment under solar panels and crop layout**. In: IEEE. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). [S. l.], 2017. p. 2048–2053.

ZHANG, Y. et al. **Influence of incidence angle effects on the performance of bifacial photovoltaic modules considering rear-side reflection**. Solar Energy, v. 245, p. 404– 409, China, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X22005771>. Acesso em: 25 de agosto de 2023.