



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

MURILO ARAÚJO LIMA

**NEXO ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: USO
DE PEQUENOS AÇUDES PARA A COPRODUÇÃO DE ALIMENTOS E
ENERGIA**

MARACANAÚ

2021

MURILO ARAÚJO LIMA

NEXO ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: USO DE
PEQUENOS AÇUDES PARA A COPRODUÇÃO DE ALIMENTOS E ENERGIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros

Aprovado (a) em: 05 / 11 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – *Campus* Maracanaú

Prof. Dr. Auzuir Ripardo de Alexandria

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza

Prof. Dr. José Carlos de Araújo

Universidade Federal do Ceará (UFC)

MURILO ARAÚJO LIMA

NEXO ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: USO DE PEQUENOS
AÇUDES PARA ACOPRODUÇÃO DE ALIMENTOS E ENERGIA

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

BANCA EXAMINADORA

Pedro Henrique Augusto Medeiros (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará –
IFCE

Auzuir Ripardo de Alexandria

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

José Carlos de Araújo

Universidade Federal do Ceará – UFC

Dados Internacionais de Catalogação na
Publicação Instituto Federal do Ceará -
IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

L732n Lima, Murilo Araújo.
NEXO ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: USO DE
PEQUENOS AÇUDES PARA A COPRODUÇÃO DE ALIMENTOS E ENERGIA / Murilo
Araújo Lima. - 2021.
57 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis,
Campus Maracanaú, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.

1. Nexo água-energia-alimento. 2. Placas fotovoltaicas flutuantes. 3. Pequenos açudes. I. Título.
CDD 620.91

RESUMO

O nexu água, energia e alimento constitui uma estrutura para análise das interações dinâmicas entre água, energia e sistemas alimentares e o desenvolvimento de estratégias para maximizar as sinergias e minimizar os trade-offs entre os três elos. O aumento da população, a melhoria dos padrões de vida, a mudança dos hábitos de consumo e o desenvolvimento econômico aceleraram a implementação de sistemas de abastecimento e, por conseguinte o consumo de água, assim ocasionando um possível quadro de escassez hídrica. A ideia pioneira de execução do nexu foi o sistema agrivoltaico, que consistem na utilização de placas fotovoltaicas inseridos na agricultura para geração de energia. Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização de pequenos açudes no semiárido brasileiro para a co-produção energética e agrícola, identificando critérios de uso da água para a maximização da renda. O modelo NeStRes opera em pequenos açudes utilizados para irrigação simulando o arranjo agrícola com base na dinâmica hidrológica de reservatórios, admitindo que a água seja o fator limitante. Com isso, vem à tona o trade-off entre a evaporação e o uso da água. No âmbito deste trabalho, foram adicionadas rotinas computacionais ao modelo de forma a simular a geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos flutuantes utilizados em pequenos açudes do Ceará. As placas flutuantes quando utilizadas em um açude intermitente, em uma parte do ano ficam sobre a água e outra parte em contato com o solo. As simulações foram realizadas nos açudes Brisamar, Buri, Serra Azul e Sítio dos Macacos. No açude Brisa-mar, a comparação entre a renda máxima sem placas fotovoltaicas flutuantes e com apenas dois por cento da área com cobertura de placas fotovoltaicas indica um aumento da renda máxima mensal em aproximadamente 10 vezes. O mesmo padrão se repete aos outros açudes, diferindo apenas na proporção do aumento da renda máxima. Em uma condição de elevada variabilidade hidrológica, que impõe restrições à atividade agrícola, a geração de energia com placas flutuantes nos açudes é uma atividade muito mais rentável. Com o uso da água apenas para a agricultura, a receita está sempre relacionada à disponibilidade hidrológica, que depende do regime pluviométrico altamente variável. Com as placas fotovoltaicas flutuantes, o cenário muda para fluxo de caixa mais previsível, uma vez que energia é gerada mesmo com o açude seco, ainda que com eficiência um pouco menor. A atividade de produção de energia fotovoltaica em pequenos açudes tem uma elevada rentabilidade no semiárido cearense devido à alta incidência solar e pela quantidade de pequenos açudes, mas exige um elevado investimento inicial para ser implantado.

Palavras-chave: Nexu água-energia-alimento; Placas fotovoltaicas flutuantes; Pequenos açudes.

ABSTRACT

The water, energy and food nexus provides a framework for analyzing the dynamic interactions between water, energy and food systems and developing strategies to maximize synergies and minimize trade-offs between the three links. The population increase, the improvement in living standards, the consumption habits and economic development accelerated the implementation of water supply systems and, consequently, the consumption of water, thus causing a possible situation of water scarcity. The pioneering idea of implementing the nexus was the agrivoltaic system, which consists of using photovoltaic panels inserted in agriculture to generate energy. This work aims to evaluate the use of small dams in the Brazilian semiarid region for energy and agricultural co-production, identifying criteria for water use to maximize income. The NeStRes model operates in small weirs used for irrigation, simulating the agricultural arrangement based on the hydrological dynamics of reservoirs, assuming that water is the limiting factor. This brings the trade-off between evaporation and water use. In the scope of this work, computational routines were added to the model in order to simulate the energy generation from floating photovoltaic panels used in small reservoirs in Ceará. The floating plates when used in an intermittent weir, in a part of the year they are on the water and another part in contact with the ground. The simulations were carried out in the Brisamar, Buri, Serra Azul and Sítio dos Macacos reservoirs. At the Brisa-mar reservoir, the comparison between the maximum income without floating photovoltaic panels and with only two percent of the area covered by photovoltaic panels indicates an increase in the maximum monthly income of approximately 10 times. The same pattern is repeated for the other dams, differing only in proportion to the increase in the maximum income. In a condition of high hydrological variability, which imposes restrictions on agricultural activity, the generation of energy with floating plates in dams is a much more profitable activity. With the use of water only for agriculture, the income is always related to hydrological availability, which depends on the highly variable rainfall regime. With the floating photovoltaic plates, the scenario changes to a more predictable cash flow, since energy is generated even with the dam dry, even with a little less efficiency. The photovoltaic energy production activity in small dams has a high profitability in the semiarid region of Ceará due to the high solar incidence and the number of small dams, but it requires a high initial investment to be implemented.

Keywords: Water-Energy-Food nexus; Floating photovoltaic panels; Small dams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mudanças na troca de energia com transições de sistemas naturais (a), painéis fotovoltaicos solares (b) e sistemas agrivoltaicos (c)	16
Figura 2 - Componentes de um sistema fotovoltaico flutuante.	20
Figura 3 - Proposta por Strangueto (2016), para sistemas sem a cobertura dos painéis (a) e com a cobertura dos painéis (b).	22
Figura 4 - Mapa da média anual diária da irradiação solar global no plano inclinado.	24
Figura 5 - Áreas disponíveis para a instalação de energia fotovoltaica em grande escala	25
Figura 6 - Esquema teórico do uso da água de um pequeno açude em relação à receita derivada da irrigação na produção agrícola	26
Figura 7 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 0% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	30
Figura 8 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 0% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	30
Figura 9 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 2% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	31
Figura 10 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 2% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	32
Figura 11 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	32
Figura 12 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	33
Figura 13 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 10% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	34
Figura 14 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 10% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	34
Figura 15 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 15% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	35
Figura 16 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 15% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	35
Figura 17 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 20% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	36
Figura 18 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 20% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	36
Figura 19 - Renda mensal máxima do açude Brisa-mar para diferentes percentuais da área do açude coberta por placas fotovoltaicas flutuantes	37
Figura 20 - Renda mensal máxima do açude Buri para diferentes percentuais da área do açude coberta por placas fotovoltaicas flutuantes.	37
Figura 21 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 0% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	38
Figura 22 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 0% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	39

Figura 23 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 2% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes.	39
Figura 24 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 2% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	40
Figura 25 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	40
Figura 26 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	41
Figura 27 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 10% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	41
Figura 28 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 10% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	42
Figura 29 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 15% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	42
Figura 30 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 15% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	43
Figura 31 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 20% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	43
Figura 32 - Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 20% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes	44
Figura 33 - Renda mensal máxima do açude Serra Azul para diferentes percentuais da área do açude coberta por placas fotovoltaicas flutuantes	44
Figura 34 - Renda mensal máxima do açude Sítio dos Macacos para diferentes percentuais da área do açude coberta por placas fotovoltaicas flutuantes.....	45
Figura 35 - Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano apenas com a produção agrícola no açude Brisamar	47
Figura 36 - Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano no açude Brisamar considerando diferentes percentuais de cobertura do açude por placas fotovoltaicas.....	48
Figura 37 - Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano apenas com a produção agrícola no açude Buri.....	48
Figura 38 - Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano no açude Buri considerando diferentes percentuais de cobertura do açude por placas fotovoltaicas.....	49
Figura 39 - Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano apenas com a produção agrícola no açude Serra Azul.....	49
Figura 40 - Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano no açude Serra Azul considerando diferentes percentuais de cobertura do açude por placas fotovoltaicas.....	50
Figura 41 - Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano apenas com a produção agrícola no açude Sítio dos Macacos.....	50
Figura 42 - Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano no açude Sítio dos Macacos considerando diferentes percentuais de cobertura do açude por placas fotovoltaicas	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos açudes escolhidos: BH, Alfa, K, h, V, Área Máx.	29
Tabela 2 - Renda máxima obtida da atividade agrícola e produção de energia fotovoltaica nos açudes simulados, relacionada ao percentual de cobertura dos açudes por painéis fotovoltaicos flutuantes	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo geral.....	13
1.1.1	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Nexo água, energia e alimento	14
2.2	Produção agrícola no semiárido brasileiro	15
2.3	Os sistemas agrivoltaicos	15
2.4	Pequenos açudes no semiárido brasileiro	17
2.5	Placas fotovoltaicas flutuantes.....	19
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1	Área de estudo.....	23
3.2	Modelo NeStRes e a inclusão de rotinas de geração fotovoltaica.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	Açudes Brisa-mar e Buri (capacidades de aproximadamente 1 milhão de m³).....	30
4.2	Açudes Serra Azul e Sitio dos Macacos (capacidades de aproximadamente 340 mil m³)	38
4.3	Renda máxima obtida da atividade agrícola e produção de energia fotovoltaica nos açudes simulados.....	45
4.4	Fluxos de caixas anuais	46
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNCIDE A - REDUÇÃO DA EVAPORAÇÃO COM PLACAS FLUTUANTES.....	56
	APÊNCIDE B - PRODUÇÃO MÉDIA DE ENERGIA POR M² DE PLACA FOTOVOLTAICA	56
	APÊNCIDE C - ANÁLISE POTENCIAL DE PLACAS FLUTUANTES EM AÇUDES NO CEARÁ.....	57
	APÊNCIDE D - AUMENTO % DE PRODUÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS FLUTUANTES	57

1 INTRODUÇÃO

O nexos água, energia e alimento constitui uma estrutura para análise das interações dinâmicas entre água, energia e sistemas alimentares e desenvolvimento de estratégias para o desenvolvimento sustentável (LIU et al., 2017). Esta estrutura está sendo desenvolvida com urgência devido às preocupações sobre as iminentes dificuldades em alimentar a crescente população mundial e o crescimento do meio tecnológico, com as progressivas restrições à disponibilidade de energia, água e recursos terrestres. De acordo com a estimativa das Nações Unidas (ONU), a população da Terra ultrapassará 10 bilhões de pessoas até 2100 (UNITED NATIONS; 2011).

A ideia do nexos água e energia está crescendo e ganhando destaque no debate sobre desenvolvimento sustentável. Nessa perspectiva, o nexos se aproxima a concepções e iniciativas vinculadas à economia ecológica, que propõe uma racionalidade no uso dos recursos naturais e ações voltadas a investir na conservação de serviços ecossistêmicos, ou seja, criar mais com menos (MIDDLETON et al., 2015).

O aumento da população, a melhoria dos padrões de vida, a mudança dos hábitos de consumo e o desenvolvimento econômico aceleraram a implementação de sistemas de abastecimento e, por conseguinte o consumo de água. No entanto, a medida que mais água é fornecida e consumida pelo ser humano, mais poluentes são despejados com as águas residuais nos rios (LIU et al., 2017)

Neste contexto de aumento acelerado de consumo dos recursos naturais, consequentes mudanças climáticas, sociais e econômicas necessitam ser incorporadas aos planos de gestão, para ação diante de possível quadro de escassez hídrica, o que poderia impactar nos demais setores do nexos e na sociedade como um todo (RODRIGUES; RAMALHO; MEDEIROS, 2020)

É comum encontrarmos a segurança hídrica estabelecida como eixo central para o conceito de nexos, especialmente diante das políticas públicas, onde tem crescido a adoção do conceito do nexos. Assim, embora água e energia estejam fortemente relacionadas na fase da produção, a segurança hídrica tem sido priorizada nos debates de nexos. Em suma, a segurança alimentar e energética só pode ser alcançada através da segurança hídrica. Desta forma, as mudanças climáticas aparecem de forma periférica neste debate, norteador a discussão, mas não como principal motivador para mudanças.

O nexos emerge com o propósito de obter o melhor balanceamento entre os recursos água, energia e alimento, alcançando seu melhor aproveitamento, ou seja, gasto mínimo de água e elevada eficiência na produção de energia e alimento.

Apesar da atenção que o nexos água-energia-alimento tem recebido de organizações internacionais, agências de desenvolvimento, acadêmicos, analistas de políticas e outras partes interessadas, ainda prevalecem as relações entre alimentos e energia. Com isto, os desafios da água como fator limitante continuam a ser enfrentados. Mesmo com o amplo setor acadêmico

existente e a literatura científica sobre as interações entre água, energia e alimento, o nexo é frequentemente fragmentado (GLASSMAN, et al. 2011).

É importante estar ciente da narrativa dominante sob a qual o debate sobre o nexo foi inicialmente enquadrado. Depois de crises financeiras, energéticas e alimentares em 2007 e 2008, o nexo água, energia e alimento surgiu como um conceito de segurança para a escassez de recursos. Ou seja, o nexo de preocupações de segurança global relacionados aos recursos naturais, levando a uma narrativa de escassez que o enquadra como um desafio técnico e de gestão (ALLOUCHE et al., 2014).

O pensamento ‘Nexus WEF’, termo utilizado na literatura internacional, torna-se uma abreviatura para esta confluência de tendências e a necessidade de compensações explícitas na formulação de políticas (DUPAR e OATES 2012). A abordagem dominante para esse pensamento de ‘nexo’ é por meio de sistemas socioecológicos, quadros analíticos que buscam entender os trade-offs e sinergias, aumentar a eficiência e melhorar a governança entre os sistemas de alimentos, água e energia (HOFF 2011; SMAJGL e WARD 2013).

Portanto, o nexo busca integrar setores, visando evidenciar as externalidades que unem os setores. Isso levanta a necessidade de discutir abertamente trade-offs e as decisões que isso acarreta. A governança dessas decisões, ou seja, quem toma decisões e para quem, também é importante, mas foi discutido com menos rigor até agora. Provavelmente por se tratar de um conceito recente da literatura acadêmica, devendo estar na sua maturidade as discussões de âmbito social político que afetam o nexo

A ideia do nexo água, energia e alimento está crescendo e ganhando destaque no debate sobre desenvolvimento sustentável. Nessa perspectiva o nexo se aproxima a concepções e iniciativas vinculadas à economia ecológica, permitem uma racionalidade e ações voltadas a investir na conservação de serviços ecossistêmicos (ALLOUCHE, MIDDLETON, GYAWALI, 2015).

Neste contexto, os setores de alimentos, água e energia muitas vezes são separados politicamente, a integração pode ser difícil de ser colocada em prática, quando encontramos pouca compreensão política das implicações das relações do nexo. A água, a energia e o alimento possuem diferentes regimes de governo, tornando a governança do nexo ainda mais difícil.

O descarte dos materiais, que faz parte da compreensão das relações do nexo, também sofre da carência de discussão política. Portanto, inserir as relações de descarte e suas implicações no nexo é uma proposta que se faz diante da expansão das energias renováveis.

Desde 2008, o nexo água, energia e alimento tornou-se um termo corriqueiro no discurso sobre desenvolvimento sustentável na comunidade internacional (SRIVASTAVA e MEHTA, 2014). As ligações entre os três setores ocorrem de maneira cíclica, onde qualquer intervenção em um dos polos pode provocar uma alteração em todo o nexo. A compreensão entre suas sinergias pode resultar em um acelerado desenvolvimento sustentável (ALLOUCHE et al., 2015).

Com esse aspecto de melhorias na segurança energética, alimentar e hídrica, nos últimos anos estão sendo implantados projetos com a utilização de energias renováveis no ciclo do nexo, com a ideia de minimizar os impactos ambientais e climáticos. O exemplo mais comum utilizado no nexo é a utilização de placas fotovoltaicas para geração de energia em cooperação na produção agrícola.

Em 2017, foi realizada uma simulação da utilização de placas solares fotovoltaicas dentro de uma plantação de uvas na Índia. O termo utilizado foi ‘*agrivoltaic*’ que significa a coprodução de energia e alimento, que traz a produção de energia solar entre as plantações de maneira que não afeta a produção agrícola (MALU; SHARMA; PEARCE, 2017).

Outro exemplo é a utilização de placas fotovoltaicas flutuantes em reservatórios de água com o intuito de produzir energia e ao mesmo tempo diminuir a evaporação do recurso hídrico (DE SACRAMENTO, 2015; FARFAN e BREYER, 2018; LOPES et al., 2020). Quando utilizado em pequenos açudes, pode influenciar positivamente na produção de pequenos agricultores que utilizam a água deste recurso hídrico, pois o sombreamento das placas reduz a evaporação.

A partir da proposta dos sistemas agrivoltaicos, este trabalho tem o intuito de avaliar as relações de perde-ganha (*tradeoffs*) entre a produção de energia e a produção agrícola em pequenos açudes no Ceará.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização de pequenos açudes no semiárido brasileiro para a co-produção energética e agrícola, identificando critérios de uso da água para a maximização da renda.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar os *tradeoffs* entre produção de energia e produção agrícola após a implantação de placas fotovoltaicas flutuantes em pequenos açudes.
- Avaliar como a implantação de placas fotovoltaicas em pequenos açudes modifica o critério de uso da água que maximiza a renda.
- Produzir informações para promover um uso mais racional de pequenos açudes na produção agrícola e de energia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Nexo água, energia e alimento

Ao longo do século XX, o crescimento populacional e o uso intenso dos recursos naturais essenciais para a vida humana geraram uma preocupação com o desenvolvimento socioeconômico e os impactos no meio ambiente. Com essa discussão, foi desenvolvido a ideia de “abordagem integrada de gestão dos recursos”, com a sigla “IWRM” internacionalmente, com o intuito de entender e otimizar a relação dos recursos. E com essa premissa, surgiu o “nexo água-energia-alimento” (ABDUL *et al.*, 2017).

A FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) (2014) definiu que “o nexo água-energia-alimento surgiu como um conceito para descrever e abordar a natureza e a inter-relação de nossos recursos naturais, dos quais dependemos para atingir diferentes objetivos sociais, econômicos e ambientais. Trata-se de equilibrar diferentes objetivos e interesses dos usuários de recursos, mantendo a integridade dos ecossistemas”.

Outra definição do nexo água, energia e alimento é demonstrada como uma estrutura para análise das interações dinâmicas entre esses recursos e o desenvolvimento de estratégias para o desenvolvimento sustentável (LIU *et al.*, 2017). É provável que o conceito de nexo possa variar em todo o mundo, dependendo dos objetivos de curto, médio e longo prazo da região e do setor.

A FAO projetou em 2014 que aproximadamente 60% a mais de alimentos e 80% a mais de energia serão necessários até 2050 para atendimento da demanda global; um aumento na retirada total de água global em 50% nos países em desenvolvimento e 18% em países desenvolvidos até 2025 também foi projetado.

Com essa preocupação do aumento do uso dos recursos no futuro, a partir de 2015 foram iniciados estudos e simulações do nexo para melhor entender as interligações, maximizar as sinergias e minimizar os *trade-offs* dos recursos, para que diminua as perdas e aumente os ganhos para existir um equilíbrio entre a natureza e o ser humano.

O nexo é analisado através de dados e modelagens que demonstram quais são os *trade-offs* e como eles podem ser minimizados com a otimização da inter-relação dos recursos. Um modelo que está disponível para o acesso é o “WEF Nexus Tool 2.0”, que ainda está em desenvolvimento no Qatar, mas já podem ser realizados algumas simulações gratuitamente.

O Nexo água, energia e alimento é tratado como um mecanismo para que seja possível melhorar o desempenho no desenvolvimento sustentável, a partir da discussão sobre meios de subsistência (KADDOURA; EL KHATIB, 2017). Seu principal resultado consiste na geração de uma estrutura integrada para medir e monitorar a segurança dos sistemas água-energia-alimento em múltiplas escalas e níveis institucionais.

O abastecimento de água, a proteção da qualidade da água e a geração de energia hidrelétrica estão interligadas e se fortalecem mutuamente. No entanto, a questão da qualidade da água, que determina se a mesma pode ou não ser utilizada, é frequentemente negligenciada nos estudos do nexo água-energia, embora tenham sido feitos esforços significativos para explorar o nexo água-energia-alimento a partir da quantidade e disponibilidade de água.

Para a produção agrícola, o fator limitante das sinergias é a água. E quando entra no contexto do semiárido brasileiro, mais especificamente no Ceará, o fator limitante se torna ainda mais crucial por conta da disponibilidade hídrica da região.

2.2 Produção agrícola no semiárido brasileiro

A agricultura é uma atividade que está sujeita às variações do clima, o que torna uma atividade instável. Essa variabilidade hidrológica pode gerar elevado risco, especialmente em regiões como o semiárido brasileiro, que a maior parte do ano possui uma média pluviométrica muito baixa.

Com esse quadro de alta variabilidade das chuvas e com os cenários de mudanças climáticas, é recomendado criar e executar um planejamento para diminuir a ocorrência de falhas na cultura irrigada, evitando-se assim prejuízos e escassez de alimentos.

A agricultura familiar é um segmento da atividade agrícola com ampla relevância, em âmbito nacional, na produção de alimentos básicos consumidos pela população brasileira, bem como para a subsistência das famílias no meio rural. A disponibilidade e a distribuição hídrica são alguns dos limitantes para a produção agrícola, principalmente nas regiões áridas e semiáridas (BRASIL, 2016).

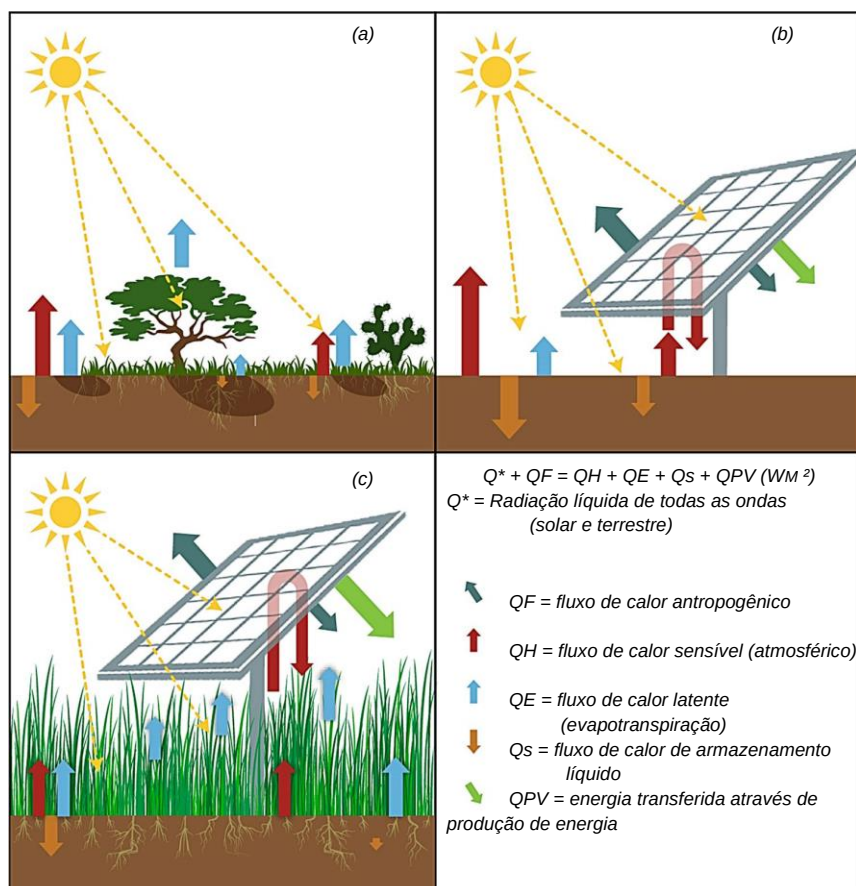
Um estudo para analisar os critérios adotados para a operação de pequenos açudes no semiárido cearense, revelou que todos os entrevistados disseram não utilizar critérios técnicos para utilizar a água dos pequenos açudes, apenas fazem uso dependendo da necessidade (SILVA, 2015). Com esse estudo, pode-se perceber a importância de um planejamento e manejo dos pequenos açudes para que possa ser utilizada a água de maneira racional através de estudos técnicos.

No processo de produção agrícola, em que os fatores solo e planta são limitados pela baixa umidade, torna-se essencial o uso da irrigação. Embora seja de grande importância, principalmente em regiões onde a distribuição irregular das chuvas é um fator constante, é necessário um planejamento para se estabelecer qualquer sistema produtivo com base em cultivo irrigado (BRASIL, 2016).

2.3 Os sistemas agrivoltaicos

Os sistemas agrivoltaicos são baseados no efeito do sombreamento parcial produzido por placas fotovoltaicas, de acordo com a tolerância de algumas culturas agrícolas, reduzindo a evapotranspiração durante o verão e sob condições de seca (AMADUCCI; YIN; COLAUZZI, 2018; ANDREW et al., 2021; PARKINSON; HUNT, 2020). Neste tipo sistema os painéis fotovoltaicos são inseridos na mesma área do cultivo para promover o sombreamento e, ao mesmo tempo, produzir energia (AGOSTINI; COLAUZZI; AMADUCCI, 2021; AL-AGELE et al., 2021; MALU; SHARMA; PEARCE, 2017). Na Figura 1 pode-se observar como é o sistema e também como são as trocas de energia em três maneiras diferentes: a) sistemas naturais sem alterações, b) painéis fotovoltaicos em solo sem plantio e; c) sistemas agrivoltaicos.

Figura 1: Mudanças na troca de energia com transições de sistemas naturais (a), painéis fotovoltaicos solares (b) e sistemas agrivoltaicos (c)



Fonte: adaptado de Barron-Gafford et al., 2019

Demonstra-se que uma cultura tolerante à sombra, como a alface, cultivada sob painéis fotovoltaicos adapta sua morfologia, por exemplo, produzindo folhas mais largas, sem redução de rendimento, e que geração elétrica fotovoltaica acoplada à produção de alface gerou um aumento de 30% na renda comparada à agricultura convencional (DINESH; PEARCE, 2016; PARKINSON; HUNT, 2020).

Uma pesquisa realizada na Índia explorou a viabilidade de implantação de sistemas agrivoltaicos em fazendas de uva, demonstrando que a instalação de placas fotovoltaicas em treliças não promoveu alterações nas safras de uva (MALU; SHARMA; PEARCE, 2017). No entanto, a receita dos produtores pode aumentar em comparação com a produção convencional devido à geração de energia.

Um outro estudo empírico feito no Arizona, EUA, localizado em uma região seca com condições semelhantes às do Ceará, calculou o potencial de um sistema agrivoltaico e o seu impacto positivo para onexo água-energia-alimento. Desta forma, constatou-se que, em terras áridas é possível obter uma redução das temperaturas das placas fotovoltaicas e uma melhoria do microclima diurno nas plantações onde são instaladas placas fotovoltaicas. Dependendo da cultura, essa alteração pode aumentar a produção agrícola ao mesmo tempo em que se gera

energia (AGOSTINI; COLAUZZI; AMADUCCI, 2021; AL-AGELE et al., 2021; BARRON-GAFFORD et al., 2019). Ademais, a coprodução de alimento e energia nos sistemas fotovoltaicos reduz os efeitos das restrições de terras, contribuindo para um futuro sustentável, evitando a exploração de novas áreas agrícolas.

Outro importante benefício dos sistemas agrivoltaicos foi explorado no trabalho de Miskin (2019): com o sombreamento das placas, o balanço hídrico em áreas cultivadas é alterado, diminuindo a frequência e volume de irrigação, tornando a produção mais econômica e reduzindo a demanda hídrica (AGOSTINI; COLAUZZI; AMADUCCI, 2021; MISKIN et al., 2019). Esse aspecto é particularmente importante em regiões tropicais, onde ocorrem elevadas taxas de evaporação potencial, e, mais especificamente, em regiões com escassez hídrica, como o Nordeste do Brasil.

2.4 Pequenos açudes no semiárido brasileiro

O semiárido brasileiro cobre uma área da ordem de um milhão de km², o que equivale a aproximadamente 10% da área total do Brasil e 90% da Região Nordeste do Brasil (TINÔCO et al, 2019).

O semiárido é conhecido por suas secas periódicas, onde a escassez de água é observada como consequência do balanço hídrico atmosférico negativo, cerca de precipitação de 600-1500 mm ano⁻¹ contra evaporação potencial de 2000-3000 mm ano⁻¹. A estação chuvosa concentra-se de janeiro a maio e é responsável por mais de 80% da precipitação anual (MEDEIROS; SIVAPALAN, 2020).

As secas frequentes em uma sociedade predominantemente agrícola levaram à migração de áreas rurais para as urbanas, com o processo de urbanização tornando-se intenso (EMBRAPA, 2018). Apesar da escassez hídrica, a atividade agrícola é importante para a economia e para a subsistência das famílias no meio rural. Apesar das limitações naturais impostas pelo clima, o semiárido brasileiro é uma importante região para produção agrícola, o qual produz aproximadamente vinte por cento de toda a produção de milho do Brasil (IBGE, 2021), observando-se a introdução de sistemas com alta eficiência na captação, no armazenamento e no uso da água (irrigação de precisão, por exemplo), e no manejo dos solos, transformando a realidade local (EMBRAPA, 2018).

No que diz respeito à disponibilidade hídrica, a partir do levantamento por imagens de satélite, é possível estimar que, somente no Ceará, existam mais de 20.000 açudes com áreas maiores que 1 hectare, resultando em uma densidade de aproximadamente 1 açude a cada 7,5 km² (PEREIRA et al. 2019).

Neste contexto, os principais usos dos pequenos açudes são para o abastecimento das famílias rurais, para dessedentação animal e para irrigação de subsistência (BRASIL e MEDEIROS, 2019). Como há baixa pluviometria em praticamente oito meses do ano e as taxas

de evaporação potencial são altíssimas (atingindo 3.000 mm ano⁻¹ em alguns locais), os pequenos açudes secam com frequência, impossibilitando o uso da água ao longo de todo o ano.

Os pequenos reservatórios são hidrologicamente pouco eficientes devido à perda de água para a atmosfera associada a suas baixas profundidades, sendo necessários poços ou cisternas para garantia de abastecimento humano de água (de ARAÚJO e BRONSTERT, 2016). Desta forma, Brasil e Medeiros (2020) argumentam que os pequenos açudes não são apropriados para o abastecimento humano, que requer elevada garantia no fornecimento hídrico.

De um modo geral, os agricultores do semiárido cearense não possuem critérios técnicos para definir qual a quantidade de água dos açudes pode ser utilizado, apenas a utilizam de acordo com a necessidade em determinada produção. Nesse contexto, é fundamental um planejamento para o manejo adequado dos pequenos açudes, possibilitando a utilização da água de maneira racional, elaborada através de estudos técnicos.

A variabilidade hidrológica na região favorece o déficit hídrico nos açudes utilizados para a irrigação. Consequentemente, as necessidades hídricas dos cultivos geralmente são supridas apenas através das precipitações pluviométrica, a chamada agricultura de sequeiro. No entanto, os açudes podem ser mais intensamente utilizados para irrigação suplementar (quando as precipitações não são suficientes para sustentar a cultura), favorecendo a agricultura de pequeno porte e reduzindo o risco de perdas na produção (BRASIL e MEDEIROS, 2020).

Brasil e Medeiros (2020) desenvolveram o modelo NeStRes (Modelo para Operação de Reservatórios Não-Estratégicos para Irrigação em Regiões Secas), que consiste em uma ferramenta para dar suporte à tomada de decisão quanto ao uso da água na agricultura irrigada. A questão científica que os autores buscaram responder foi: qual o volume de água que poderá ser retirado periodicamente de um pequeno açude, para ter uma maior rentabilidade na produção agrícola? O modelo, portanto, é definido a partir da relação entre a rentabilidade e garantia de uso da água do recurso hídrico. Com isto, após simulações com o modelo, constatou-se que para uma melhor rentabilidade na agricultura é necessária utilização intensa do volume do açude para irrigação suplementar, devido ao *trade-off* entre uso da água e a evaporação: se a água é mantida por muito tempo no açude perde-se excessivamente através da evaporação.

O modelo simula o arranjo agrícola com base na dinâmica do balanço hídrico de reservatórios, admitindo que a água seja o fator limitante.

O modelo foi aplicado a 91 reservatórios (capacidade de armazenamento de 350.000 a 17.000.000 m³) localizados na bacia do rio Banabuiú, com aproximadamente 19.800 km² no Nordeste do Brasil.

Os autores argumentam que, no semiárido brasileiro, prevalece a prática conservadora de economizar água nos reservatórios, um valor cultural resultante de: 1) severos impactos socioeconômicos de secas no passado; 2) operação de reservatórios com alta garantia, introduzida por técnicos para estruturas estratégicas de abastecimento humano e servindo como diretriz independente dos usos da água; 3) relevante para a pecuária, pois um pequeno açude tem um papel importantíssimo na produção.

No entanto, a maioria dos pequenos reservatórios não conseguem suportar secas prolongadas e secam completamente devido às altas taxas de evaporação. Esses reservatórios são, portanto, inadequados para o abastecimento humano, mas podem ser usados de outra forma.

2.5 Placas fotovoltaicas flutuantes

Globalmente, as fontes de energias renováveis registraram um aumento de 8% ao ano em potência instalada na década de 2010. Este aumento está sendo impulsionado pelo desenvolvimento do setor fotovoltaico, que registrou uma taxa de crescimento de 45% (ROSA-CLOT e TINA, 2020).

Um sistema fotovoltaico convencional é constituído por módulos solares, materiais elétricos, estrutura/suporte, inversores, controladores de carga e sistema de monitoramento. O módulo solar é uma placa com células fotovoltaicas, normalmente à base de silício, agregadas que geram energia a partir da incidência solar. O arranjo é estruturado em suportes metálicos para melhor distribuição e segurança do equipamento.

Essa energia produzida em corrente contínua é transportada pelos materiais elétricos (cabearamento) até o inversor, o qual transforma a energia em corrente alternada, assim podendo ser utilizada em residências, por exemplo. Todos os dados de energia gerada em tempo real são disponibilizados em um sistema de monitoramento de energia solar.

Existem, no entanto, dois limites principais no uso de placas fotovoltaicas terrestres como fonte de energia: o uso do solo e a falta de incentivos:

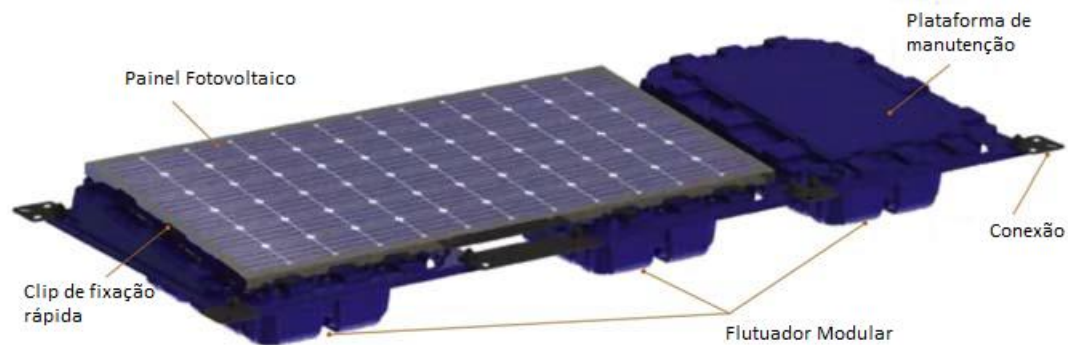
- **Uso da terra:** A necessidade de uma grande superfície de terra devido à baixa eficiência do painel fotovoltaico, implica que uma estação de energia de 1 MWp requer pelo menos 15.000 m² de terreno, e isso tende a gerar conflito.

- **Incentivos:** O mercado fotovoltaico foi realizado por valores de incentivos muito altos. Estes eram necessários para as startups do setor fotovoltaico, mas fez com que os clientes usassem grandes áreas de terra, que poderiam ter sido explorados para outros fins econômicos.

Um sistema fotovoltaico flutuante é composto de três estruturas: painel fotovoltaico, flutuadores e conexões. Como mostra a Figura 2, os painéis fotovoltaicos são fixados nos flutuadores, onde ambos possuem conexões simples e rápidas e com menos manutenção.

Entre os painéis fotovoltaicos há uma plataforma de manutenção, feita com o mesmo material do flutuador, mas possui um plástico em uma forma de piso para ter uma melhor aderência e ser mais seguro para os técnicos que realizam a manutenção.

Figura 2 – Componentes de um sistema fotovoltaico flutuante.



Fonte: Adaptado de ROSA-CLOT, M.; TINA, G. M.; NIZETIC, 2017

É bastante evidente que o setor fotovoltaico está em forte expansão porque as usinas fotovoltaicas são simples e baratas, além de facilmente e rapidamente instaladas. Outras características que favorecem o crescimento do setor são:

- Simplicidade e confiabilidade;
- Escalabilidade;
- Disponibilidade em todo o mundo;
- Baixo impacto ambiental.

Já as plantas fotovoltaicas flutuantes (FPV) abrem novas oportunidades que não foram totalmente exploradas com as terrestres. De acordo com Tina e Rosa-clot (2020), as principais vantagens do uso na superfície de um recurso hídrico podem ser resumidas nos itens abaixo:

I. Forte redução da ocupação do solo.

Uma das principais vantagens de plantas fotovoltaicas flutuantes é que não ocupam áreas que possam ser utilizadas para outros fins. Plantas flutuantes necessitam um maior investimento inicial do que plantas terrestres, mas fornecem principalmente, e acima de tudo, uma forma para evitar competir com zonas agrícolas. Além disso, ao contrário de plantas fotovoltaicas terrestres, as plantas flutuantes têm um impacto mais limitado sobre a paisagem.

II. Instalação

Plantas FPV são mais compactas do que as plantas terrestres, sua gestão é mais simples e sua construção é mais direta. O ponto principal é que não existem estruturas fixas, e a amarração de sistemas flutuantes pode ser realizada de forma reversível, ao contrário das fundações usadas para uma planta terrestre.

III. Economia e qualidade da água.

A cobertura parcial de corpos hídricos tem benefícios adicionais, como a redução da evaporação da água. Esse resultado depende das condições climáticas e da porcentagem de superfície coberta. Em climas áridos, esse benefício é mais impactante porque a taxa de evaporação é mais alta, assim reduzindo diretamente proporcional à área da planta fotovoltaica.

IV. Resfriamento

A estrutura flutuante permite uma maior produção de energia devido ao resfriamento ocasionado pela superfície da água, diminuindo a temperatura dos painéis e tornando o sistema mais eficiente.

V. Cooperação com usinas hidrelétricas

Plantas FPV podem integrar vantajosamente em outras gerações de energia renovável. Utilizando o mesmo corpo hídrico, pode ser gerado energia em turbina hidrelétrica e em painel fotovoltaico, ainda aproveitando a mesma infraestrutura de distribuição da energia produzida.

VI. Controle do ambiente

Uma vantagem paralela é a contenção do problema da proliferação de algas, que é especialmente grave em países industrializados. A cobertura parcial de corpos hídricos e a redução de luz logo abaixo da superfície do manancial pode ajudar a resolver o problema.

VII. Redução do custo específico de energia.

Isso é um item importante, talvez o crucial. A evolução da tecnologia de plantas fotovoltaicas flutuantes reduziu os custos para abaixo do padrão, especialmente em regiões tropicais onde a gestão da terra e a manutenção de plantas terrestres são muito caras. Atualmente o custo específico de kWh varia entre 3 e 6 centavos de US\$ dependendo da radiação local.

Atualmente, a maior desvantagem no uso de sistemas fotovoltaicos flutuantes é o custo inicial e de manutenção. Ao comparar com os custos de uma planta fotovoltaica terrestre, as flutuantes além de toda a manutenção e custos equivalentes ao de uma terrestre, também possui em sua estrutura os flutuadores, e a manutenção é mais complexa.

Por outro lado, a principal vantagem da cobertura fotovoltaica flutuante é melhorar o balanço de água-energia nos corpos hídricos (GISBERT *et al*, 2013). Além disso, grande parte dos projetos que utilizam essa cobertura contam também com a preservação da água para utilização na irrigação como um fator chave. Essa análise água-energia pode ser observada na

Figura 3 - Proposta por Strangueto (2016), para sistemas sem a cobertura dos painéis (a) e com a cobertura dos painéis (b).

Figura 3: Balanço de água-energia



Fonte: STRANGUETO, 2016.

Os fatores presentes na dinâmica dos reservatórios são as perdas de água por evaporação, troca de calor, precipitação, infiltração, radiação, reflexão, entrada de água e saída de água. Corpos hídricos naturais (a) recebem altas taxas de radiação solar, ocasionando grande evaporação anual e considerável troca de calor com a superfície do reservatório. Com a instalação de placas flutuantes no meio aquático (b) a evaporação é reduzida, consequência do sombreamento gerado pelo sistema sobre o corpo d'água, proporcionando menor troca de calor com a região alagada e contribuindo com a geração de energia elétrica, consequentemente, aumentando a disponibilidade de água e energia.

Assim, quando alterado o local de implantação das placas para um recurso hídrico, não há a preocupação de área construída, ou impactos nas áreas de plantação, ou até mesmo o desmatamento. Pois a maior restrição em relação à rede de placas fotovoltaicas flutuantes são os usos do açude.

Uma simulação de uma usina fotovoltaica flutuante no reservatório tropical de Gavião, no município de Pacatuba (RODRIGUES; RAMALHO; MEDEIROS, 2020), o qual tem capacidade de aproximadamente 33 milhões de m³, o potencial de geração de energia no cenário pessimista (835.820 MWh / ano) é suficiente para atender 19% da demanda da cidade de Fortaleza (4.627.482 MWh / ano), com aproximadamente 2.600.000 habitantes, com uma média de aproximadamente 21 kWh/m². mês. Com toda essa área sombreada com as placas fotovoltaicas, pode-se obter uma grande redução na evaporação do recurso hídrico, ou seja, com o sombreamento causado pelo sistema flutuante, estimou-se que 2.595.000 m³/ano de água deixariam de ser evaporados, o suficiente para abastecer 1,5% da demanda anual total de Fortaleza (RODRIGUES; RAMALHO; MEDEIROS, 2020).

Alguns estudos encontraram uma redução de 70% da evaporação do recurso hídrico (Sacramento *et al*, 2015), demonstrando que o uso de plantas fotovoltaicas flutuantes não se

constitui apenas com o foco na produção de energia, mas também na redução da evaporação, principalmente nas regiões semiáridas (Lopes *et al*, 2020).

Os pequenos açudes do semiárido brasileiro são usados principalmente para abastecimento da população rural e produção de alimentos. Com a instalação de sistemas fotovoltaicos flutuantes espera-se uma maior disponibilidade de água devido ao sombreamento do manancial, permitindo maior produção agrícola e ao mesmo tempo geração de energia, com potencial para aumentar a renda dos pequenos agricultores.

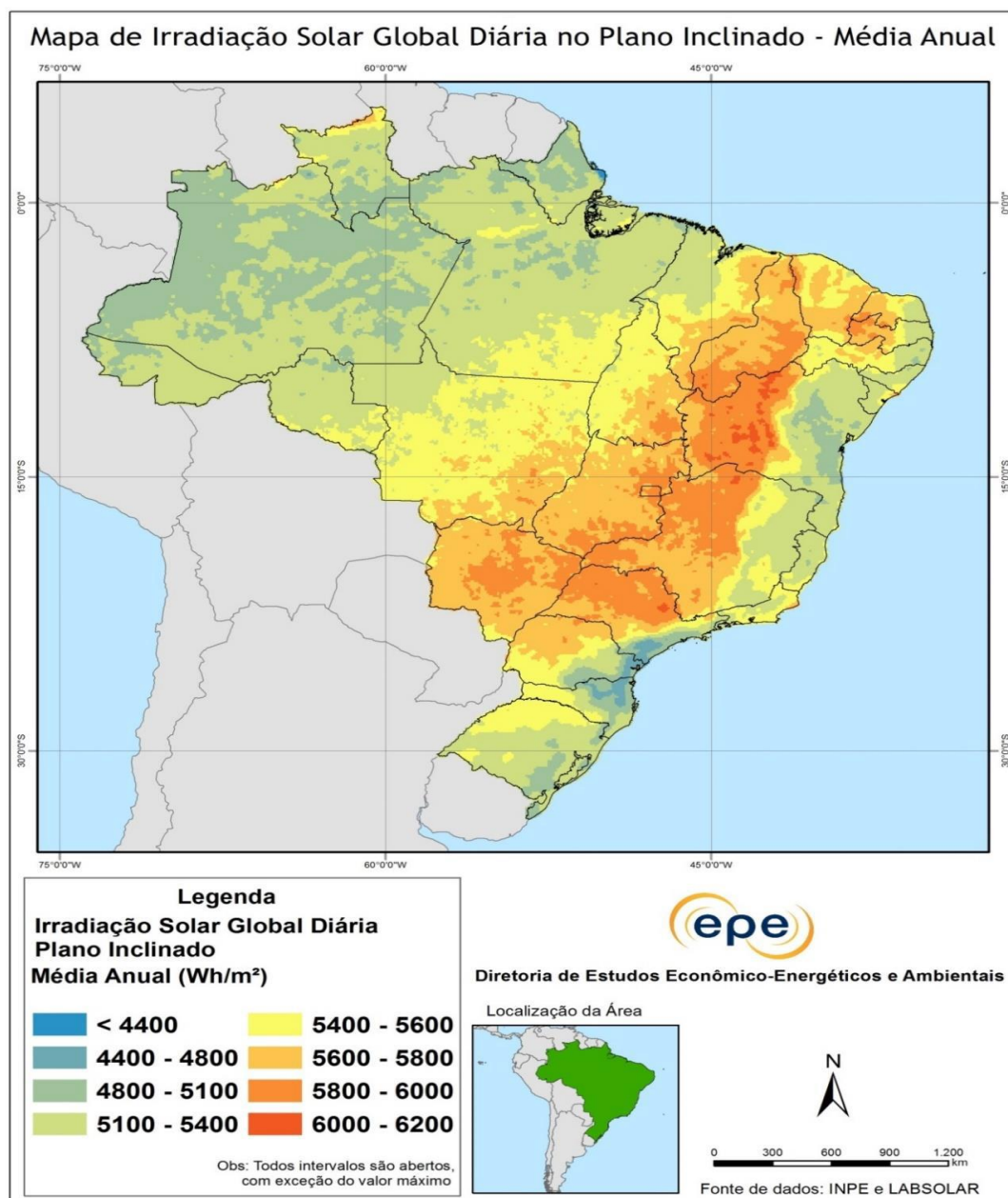
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estado do Ceará, na região Nordeste do Brasil, constitui uma geografia privilegiada para o desenvolvimento da geração fotovoltaica, seja centralizada, em grandes usinas, ou descentralizadas, nos telhados das casas. Considerando que a faixa de variação da irradiação global horizontal anual do Brasil seja de 1.500 a 2.200 kWh/m² (aproximadamente 4400 a 6200 Wh/m²), praticamente todo território brasileiro é elegível à expansão do aproveitamento deste recurso (EPE, 2018). Mas como se vê na Figura 4, as regiões Nordeste e parte do Centro-Oeste e do Sudeste se apresentam mais vantajosas.

Por sua vez, as regiões Norte e Nordeste, mais próximas da linha do equador, apresentam maior facilidade para o aproveitamento dos sistemas de geração fotovoltaico nas edificações devido o ângulo de incidência solar verificado pela aproximação com a linha do equador, o que no sul do país necessita de um posicionamento mais específico dos painéis para um aproveitamento adequado da irradiação solar (SANTOS, 2013).

Figura 4 – Mapa da média anual diária da irradiação solar global no plano inclinado.



Fonte: EPE, 2018.

Entre os critérios para definição de restrições que excluem a possibilidade de implantação de sistemas fotovoltaicos terrestres, destacam-se: áreas protegidas; uso e ocupação do solo; topografia; recursos hídricos e expansão urbana. Ao excluir essas 5 áreas impedidas de instalação, Almeida (2018) obteve o seguinte mapeamento (Figura 5) das áreas para instalações de energia fotovoltaica em grande escala no Ceará. Observar que o objetivo deste trabalho é analisar a implantação de placas flutuantes em reservatórios hídricos, eliminando uma das restrições indicadas por Almeida (2018).

Figura 5: Áreas disponíveis para a instalação de energia fotovoltaica em grande escala



Fonte: ALMEIDA, 2018.

O estado do Ceará, onde o estudo foi desenvolvido, é em grande parte semiárido quente com temperaturas médias mensais variando de 25 ° C a 29 ° C, precipitação média e evaporação potencial da ordem de 750 mm e 2500 mm por ano (INMET, 2018).

A precipitação é altamente variável no tempo (MEDEIROS e DE ARAÚJO, 2014): a estação chuvosa concentra-se de fevereiro a maio, sendo responsável por 75% da precipitação anual, e uma média de 36 dias por ano com precipitação superior a 5 mm. A alta variabilidade temporal da disponibilidade de água levou à construção de barragens, gerando uma rede de reservatórios muito densa com mais de 20.000 reservatórios com áreas superficiais maiores que 1 ha no Ceará (PEREIRA et al., 2019).

Os açudes analisados nesta pesquisa são o Açude Brisamar, localizado no município de Maranguape; Açude Buri, localizado no município de Sobral; Açude Serra Azul, localizado no município de Ibareta; Açude Sítio dos Macacos, localizado no município Piquet Carneiro.

O intuito é mostrar o potencial de geração de energia e se é alterado quando utilizado em duas regiões com climas diferentes. Maranguape e Ibareta são situadas em região serrana com o clima mais úmido, enquanto Sobral e Piquet Carneiro são situadas em região com clima semiárido.

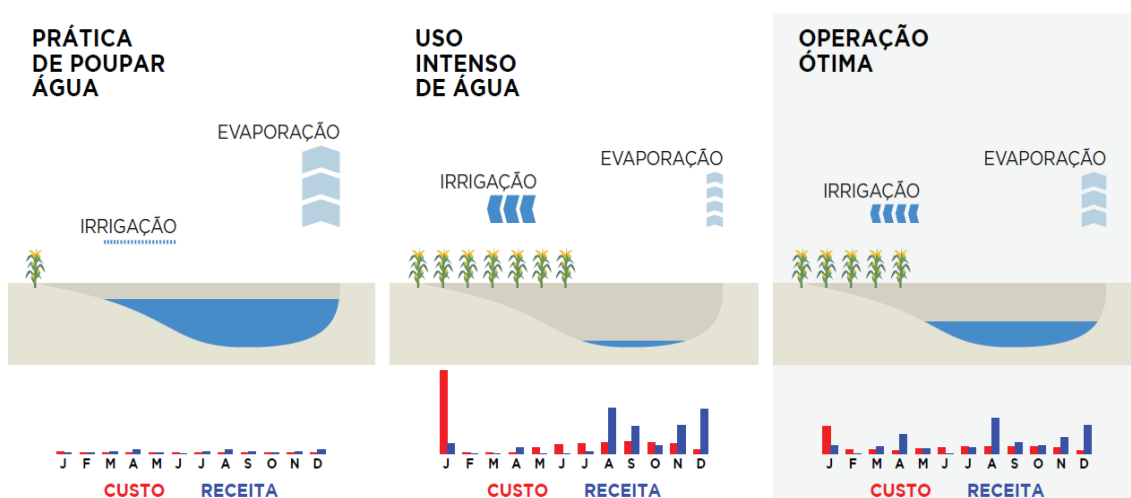
Os açudes Brisamar e Serra azul são localizados na Bacia Metropolitana, o açude Buri é localizado na Bacia do Acaraú e o açude Sitio dos Macacos é localizado na Bacia do Banabuiú.

3.2 Modelo NeStRes e a inclusão de rotinas de geração fotovoltaica

O modelo NeStRes para proposição de regra de operação de pequenos açudes para irrigação simula o arranjo agrícola com base na dinâmica hidrológica de reservatórios, admitindo que a água seja o fator limitante. No módulo hidrológico, a disponibilidade de água é avaliada pelo cálculo da dinâmica temporal do reservatório.

Com isso, vem à tona o *trade-off* entre a evaporação e o uso da água, pois ao se adotar a ideia de poupar a água do pequeno açude para prolongar a produção agrícola com menos intensidade, as perdas por evaporação serão maiores porque o açude é mantido com maior volume armazenado e, portanto, maiores áreas expostas à atmosfera (Figura 6).

Figura 6: Esquema teórico do uso da água de um pequeno açude em relação à receita derivada da irrigação na produção agrícola



Fonte: Brasil et al., 2021.

No módulo agrícola, foi simulada a cultura agrícola do milho, onde o balanço hídrico é calculado em um cronograma diário, considerando o manejo da irrigação via clima, ou seja, o

cálculo dos fluxos de água na zona radicular, com base em variáveis climáticas, para definir a quantidade a irrigar.

O modelo considera irrigação e precipitação como componentes de entrada, enquanto as perdas por percolação profunda, escoamento superficial, evaporação e consumo de água pelas plantas (evapotranspiração) são os componentes de saída.

As simulações demandam alguns parâmetros, tais como: as características do solo para o cultivo; a demanda hídrica da cultura para a produção; os custos para a implantação e manutenção do sistema de irrigação; o valor da venda do milho; taxas de juros e rendimento; dentre outros.

Com o manejo adequado durante os períodos de déficit hídrico, nos quais a irrigação é promovida de forma a atingir a capacidade de campo, pode-se eliminar o escoamento, a percolação profunda e a evaporação direta, restando irrigação, precipitação e evapotranspiração.

A irrigação variável com o tempo é definida para aumentar o conteúdo de água do solo até a capacidade do campo antes que a cultura esteja sob estresse hídrico. A condição de irrigação é que a umidade do solo seja igual ou inferior à água prontamente disponível, ou seja, pode ser extraída do solo sem déficit hídrico para a cultura. A água prontamente disponível é calculada como uma porcentagem da água máxima disponível no solo.

A lâmina de irrigação é variável no tempo, portanto, o volume de água a ser retirado do reservatório para irrigação em um dia não é constante, ou seja, o volume de água armazenado no reservatório é subtraído do volume retirado no final de cada dia em que a irrigação é necessária.

O módulo econômico calcula um balanço financeiro considerando os custos e receitas do sistema de produção agrícola. Os custos referem-se à produção (preparo do solo, sementes, agrotóxicos, mão de obra); eletricidade; e custo de aquisição inicial do sistema de irrigação.

A degradação da infraestrutura ao longo do tempo é considerada admitindo que os equipamentos e tubulações devam ser substituídos a cada 10 anos e introduzindo tais custos na simulação. A receita corresponde ao valor obtido com a venda da produção ao final do ciclo da cultura, admitindo-se um preço fixo (R\$.kg⁻¹) do produto.

O balanço financeiro é calculado mensalmente e aplica-se uma taxa de juros anual de 10 % ao valor acumulado quando este é negativo, enquanto para saldos positivos é considerada uma taxa de retorno de 0,65 % por mês. Com base nesse arranjo, um valor de renda fixa é otimizado até que o saldo seja igual a zero no final da simulação, permitindo oscilações positivas e negativas. Realizada em longos períodos, a simulação contempla a variabilidade hidrológica e seu impacto na produção da safra.

Todo o procedimento é repetido para diferentes níveis de garantia de fornecimento de água, ou seja, para diferentes cenários de disponibilidade de água. Consequentemente, as

receitas mensais são obtidas para cada nível de garantia, cultivo e irrigação usado nas simulações, apoiando a decisão dos agricultores sobre qual combinação adotar.

No âmbito deste trabalho, foram adicionadas rotinas computacionais ao modelo NeStRes de forma a simular a geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos flutuantes utilizados em pequenos açudes do Ceará.

Em toda a simulação de geração de energia fotovoltaica foram utilizados os dados hidrológicos e econômicos do modelo NeStRes, no qual foi feita uma adaptação para considerar a renda proveniente da geração de energia junto com a produção agrícola.

O cálculo da geração de energia foi baseado na área da superfície do açude utilizada no modelo NeStRes. Como as placas são flutuantes, quando utilizadas em um açude intermitente, em uma parte do ano as placas ficam sobre a água e outra parte em contato com o solo.

Essa conexão entre a rotina de produção de energia fotovoltaica e a hidrológica é fundamental devido à diferença de produção entre o flutuante e o terrestre. De acordo com Sacramento (2015), as placas flutuantes têm um potencial de 9,5 a 14,5 por cento a mais de produção de energia no Brasil em relação às terrestres. Neste estudo, foi utilizado um cenário pessimista para quantificação da produção de energia de placas sobre a água, considerando-se 10% de aumento.

Como a área de superfície de água é um fator limitante para a geração, cada simulação com uma área diferente de placas produz um valor diferente para o tempo em que as mesmas permanecem na água e no solo, conseqüentemente, alterando a geração de energia.

Para o cálculo da redução da evaporação devido ao sombreamento provocado pelas placas fotovoltaicas flutuantes, foi utilizada a Equação (1) (ASSOULINE; NARKIS; OR, 2011), onde a redução é calculada a partir da porcentagem da área de placas em relação à área total do açude.

$$\varepsilon = 100 - (100 - x)^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Onde: ε é a redução da evaporação em % e x é a porcentagem da área do açude coberta por placas flutuantes.

A partir desta redução da evaporação, o volume armazenado e área do espelho d'água do açude são alterados, mantendo-se mais elevados ao longo do tempo e, conseqüentemente, gerando mais energia fotovoltaica por conta do maior tempo em que as placas estarão flutuando na água.

Uma vez calculada a produção mensal de energia, é possível se estimar a renda equivalente, obtida pela venda desta energia gerada (ou abatimento em conta de energia, como é praticado no Brasil em caso de microgeração), assim calculando a renda mensal geral de produção agrícola mais a produção de energia.

Para se avaliar o efeito da utilização de placas fotovoltaicas flutuantes sobre a renda e também sobre a regra de operação do açude que maximiza a renda, foram simulados açudes em condições distintas de capacidade e clima. Em relação à capacidade, foram escolhidos dois açudes com valor aproximado de 1 milhão de m³ e dois açudes com valores de aproximadamente 340 mil m³. Já o clima foi dividido entre semiárido e úmido, ou seja, nas Classes I e II de uso da água conforme definido por Brasil et al. (submetido). As características dos açudes simulados podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos açudes escolhidos: BH, Alfa, K, h, V, Área Máx.

Classe	Cidade	Açude	BH (km ²)	α	K	h (m)	V (m ³)	Área Máx (m ²)
I	Sobral	Buri	5,28	3,08	1230	8,86	1.017.300	354.093
II	Maranguape	Brisa-mar	4,14	3,50	1129	6,95	999.600	503.180
I	Piquet Carneiro	Sítio dos Macacos	2,26	2,33	1921	9,30	348.649	86.889
II	Ibaretama	Serra Azul	13,92	2,25	4096	7,07	334.100	106.247

Onde, BH = Área da bacia hidrográfica;

α = Coeficiente de forma do açude;

K = Coeficiente de abertura do açude;

$$V = K.h^a$$

h = Altura da parede do açude;

Cap = Capacidade volumétrica do açude;

Área Máx = Área máxima do açude.

As simulações foram realizadas adotando-se as porcentagens de coberturas com placas fotovoltaicas de 0, 2, 5, 10, 15 e 20 por cento da área total de cada açude.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da modificação do modelo NeStRes para operação de pequenos açudes para irrigação, com a adição de uma planta de geração fotovoltaica flutuante, foram propostas diferentes coberturas por placas fotovoltaicas em relação à área total dos açudes. Os resultados obtidos, correlacionando a renda e a produção agrícola e de energia fotovoltaica, são apresentados a seguir.

4.1 Açudes Brisa-mar e Buri (capacidades de aproximadamente 1 milhão de m³)

A primeira simulação foi feita com 0 por cento de cobertura, ou seja, sem utilização das placas fotovoltaicas flutuantes para relacionar apenas o uso da água (calculado como porcentagem de disponibilidade hídrica do açude) com a produção agrícola. Essa proposta de não utilizar planta fotovoltaica, representando com a concepção original do modelo NeStRes, pode ser vista nas Figuras 7 e 8 para os açudes Brisa-Mar e Buri, respectivamente.

Como se pode perceber, para os agricultores que utilizarem a água dos dois açudes para a produção agrícola, em relação à rentabilidade é melhor utilizar a água com maior intensidade para não perder muito volume pela evaporação. A faixa de garantia de fornecimento hídrico que maximiza a renda é de 20% a 30%, ou seja, usar a água mais intensamente deixando o açude secar entre 70% e 80% do tempo seria a melhor opção.

Figura 7– Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 0% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

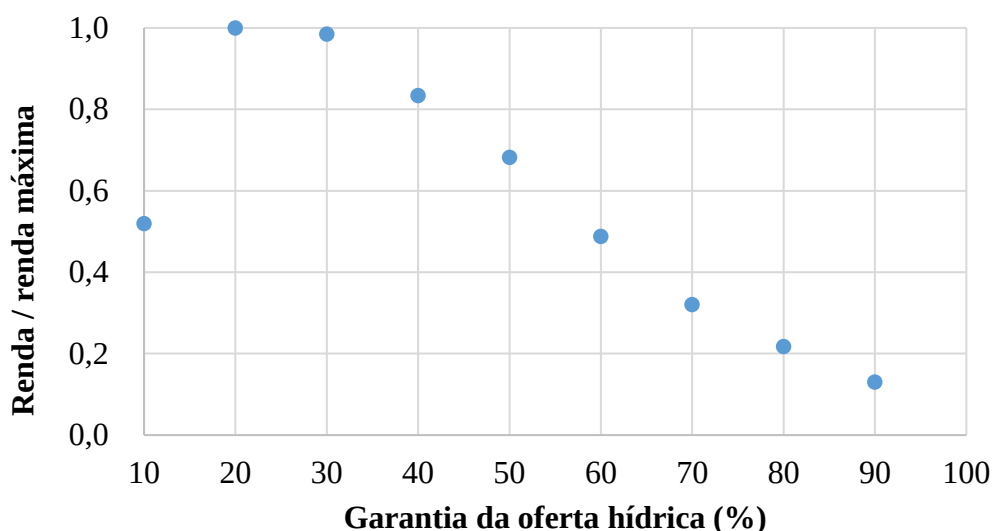
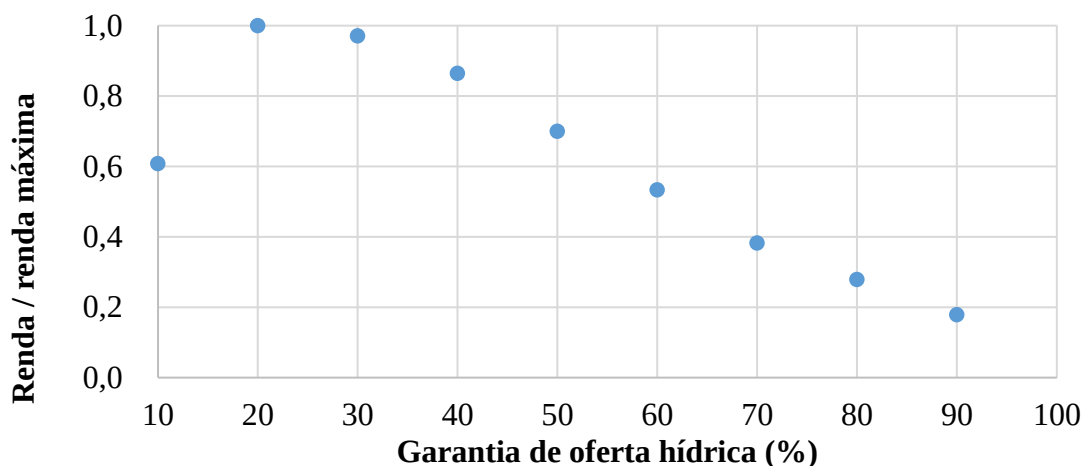


Figura 8 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 0% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



Admitindo 2% de cobertura do açude por placas fotovoltaicas flutuantes, estima-se uma redução de 1,3% da evaporação do recurso hídrico, ou seja, não produz um impacto tão significativo no volume de água armazenada. Mas como se pode ver nas Figuras 9 e 10, a curva da relação da renda com a garantia de fornecimento hídrico fica praticamente horizontal, o que mostra que mesmo com uma área pequena de placas fotovoltaicas flutuantes, a maior parte da renda será da geração de energia.

O pico de renda máxima se manteve em 20 a 30 por cento de garantia, pelo motivo da área de placas ser pequena, então mesmo utilizando um valor alto de volume de água na agricultura, a produção de energia praticamente não será afetada porque mesmo baixando muito o nível d'água, as placas continuam na superfície d'água praticamente todo o tempo, assim não diminuindo a eficiência de geração de energia.

Figura 9 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 2% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

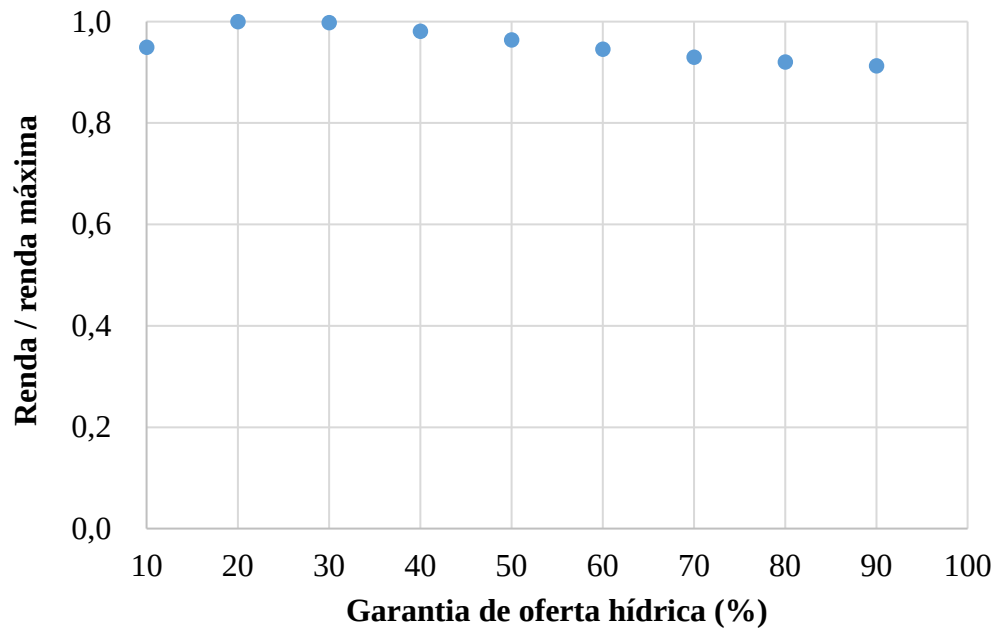
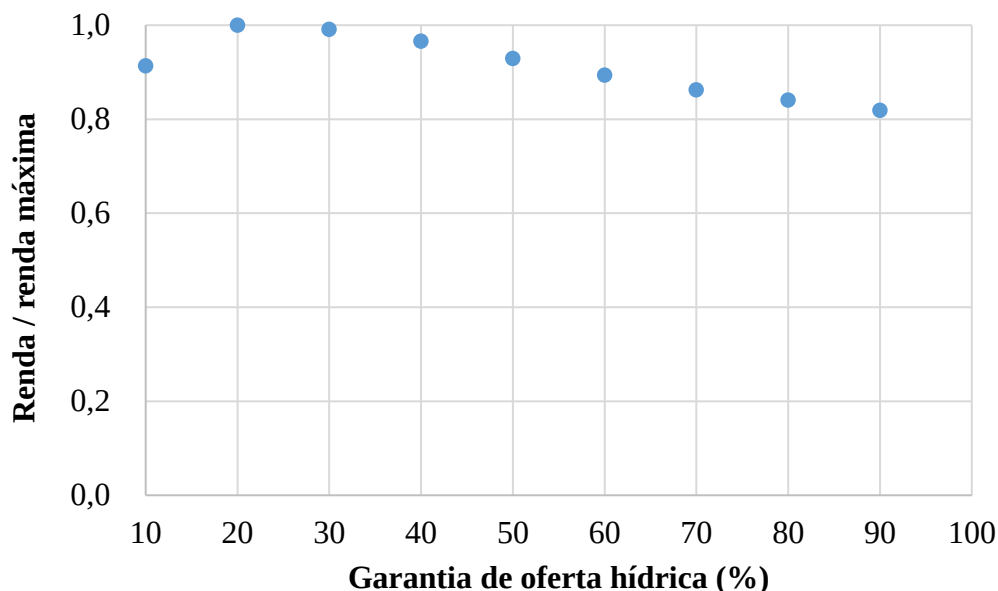


Figura 10 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 2% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



Os resultados relacionados à regra de operação do açude que maximiza a renda começam a mudar mais a partir de 5% por cento da cobertura do açude com placas. Com essa área de placas, estima-se redução de 3,4% da evaporação, ou seja, já começa a ter um impacto considerável em relação ao volume de água acumulada do açude.

A partir de 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes, a produção de energia se torna muito mais relevante financeiramente do que a produção agrícola.

Figura 11 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

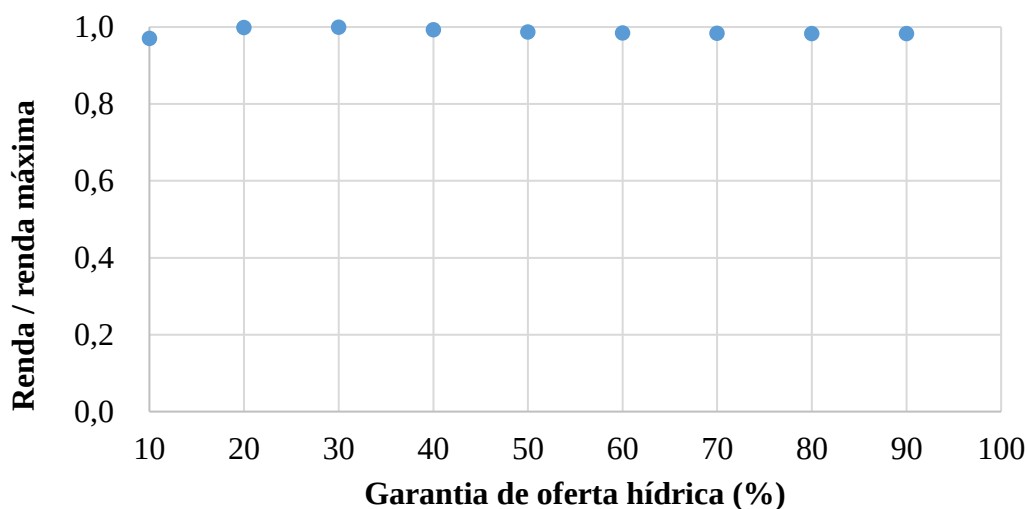
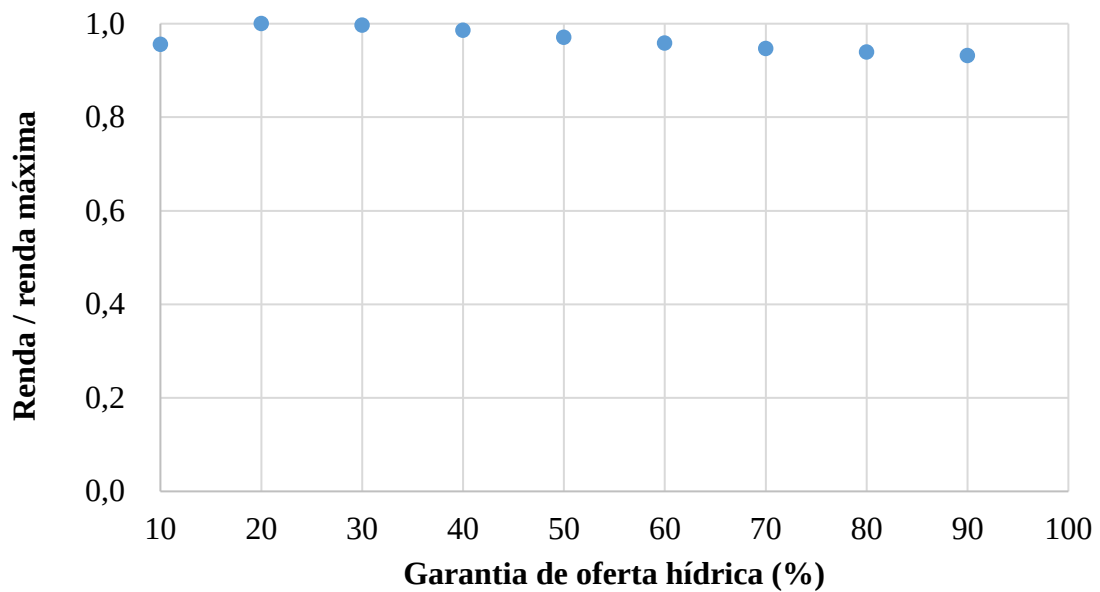


Figura 12 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



A partir de 10% de cobertura de placas, o gráfico de renda versus garantia de oferta hídrica começa a ter uma tendência crescente. Isso significa que quanto maior for a garantia de fornecimento de água do açude, ou seja, quanto menor for a vazão retirada do açude para uso, maior será a rentabilidade geral de energia e agricultura. Isso ocorre porque, nessas condições, a área de placas começa a ocupar uma área expressiva do açude, então se a água for utilizada intensamente na agricultura e à medida que o açude seca, a produção de energia é reduzida. Ou seja, quanto mais tempo o nível da água ficar elevado no açude, maior será a produção de energia e a renda.

Utilizando 10% da área do açude com cobertura de painéis fotovoltaicos flutuantes, resulta em uma redução de 6,8% da evaporação, assim podendo-se utilizar um maior volume de água na agricultura. A partir desse percentual de cobertura do açude com painéis fotovoltaicos, demonstra-se que quanto maior for a garantia de fornecimento hídrico do açude, ou seja, quanto menor for o uso da água, maior será a rentabilidade proveniente da atividade agrícola e da geração de energia.

Figura 13 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 10% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

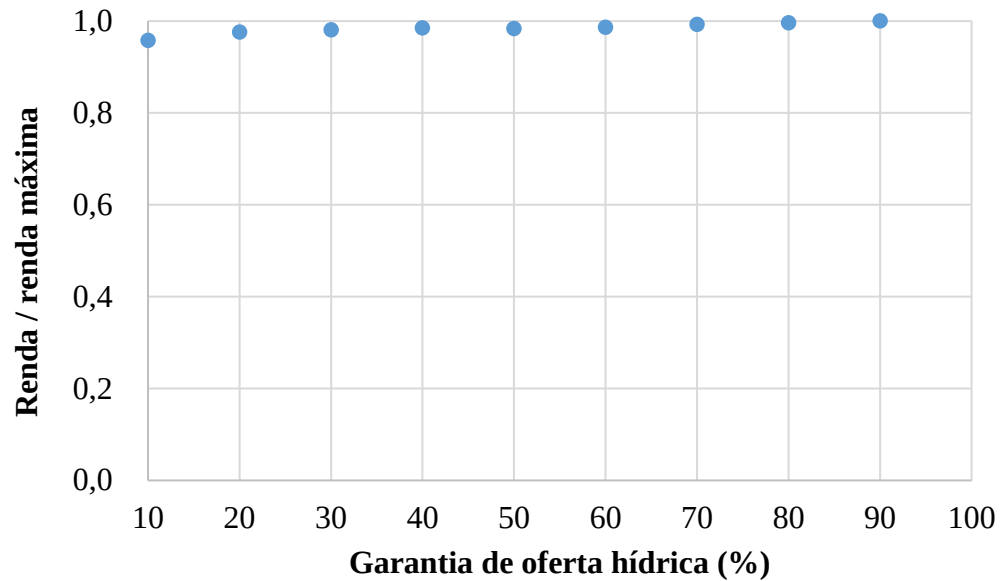
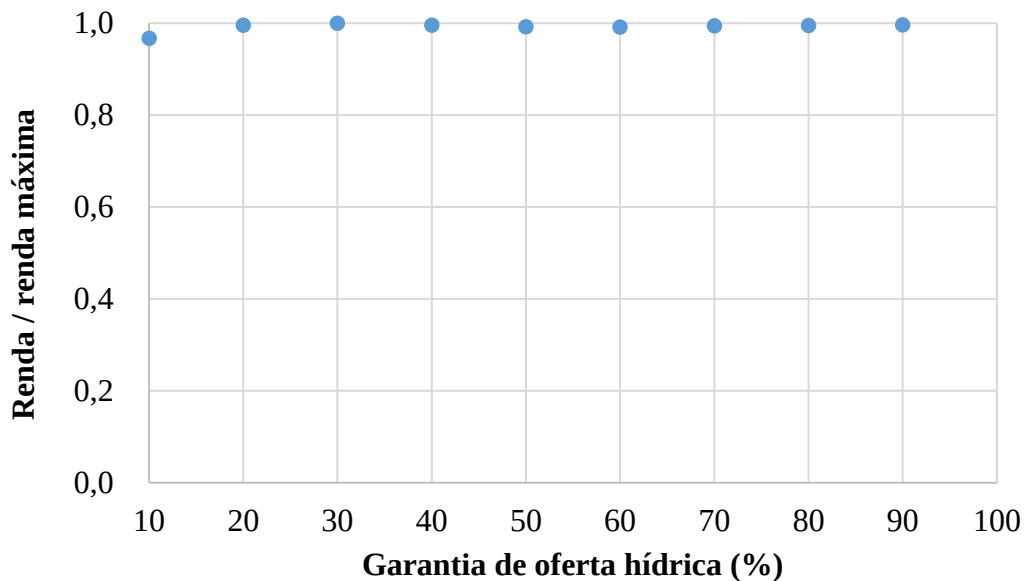


Figura 14 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 10% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



Ao aumentar a área do açude coberta por painéis fotovoltaicos para além de 10% observa-se a mesma tendência: nas Figuras 10 e 11, com 15% de cobertura observa-se uma redução de 10,3% de evaporação, e nas Figuras 15 e 16 com 20% cobertura observa-se uma redução de 13,8% de evaporação.

Portanto, a partir de 10% de cobertura da área total do açude com painéis fotovoltaicos, quanto maior for a cobertura, maior será a redução de evaporação e mais crescente será a curva de renda versus garantia de fornecimento hídrico, ou seja, quanto mais tempo a água

permanecer no açude, maior será a produção de energia, assim maior será a rentabilidade geral obtida a partir do recurso hídrico.

Figura 15 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 15% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

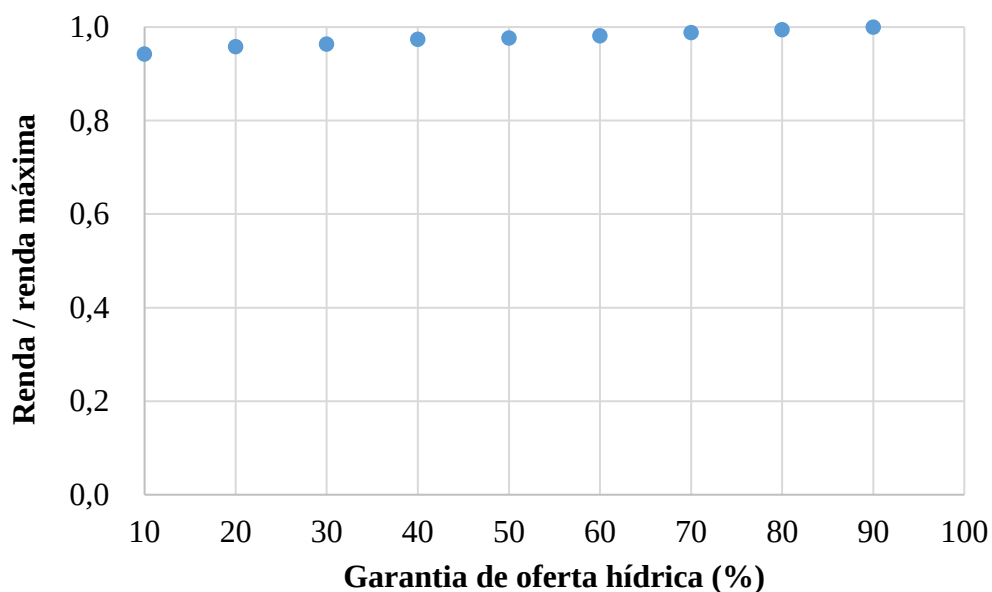


Figura 16 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 15% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

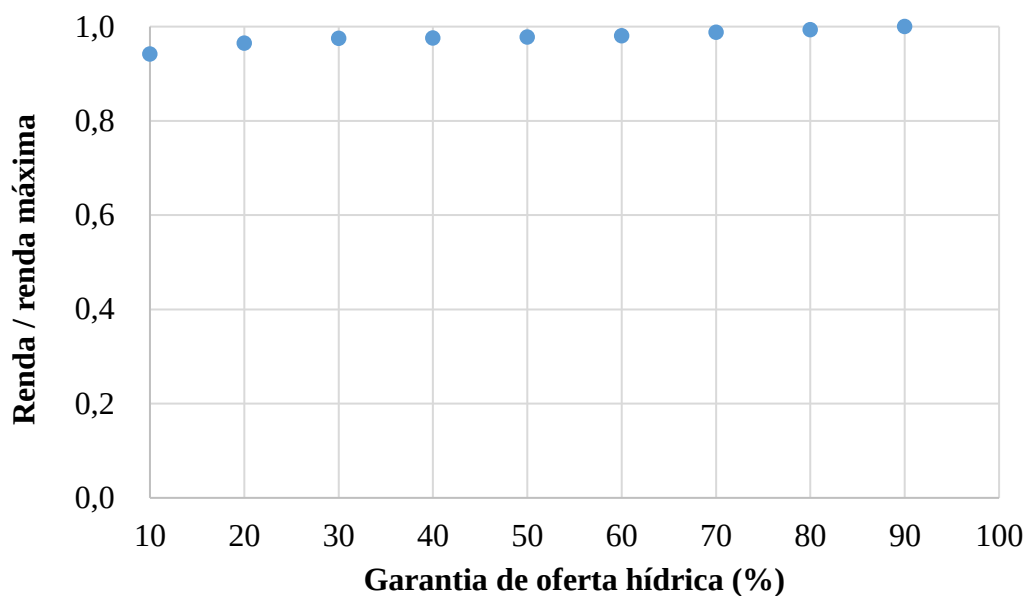


Figura 17 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Brisa-mar para 20% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

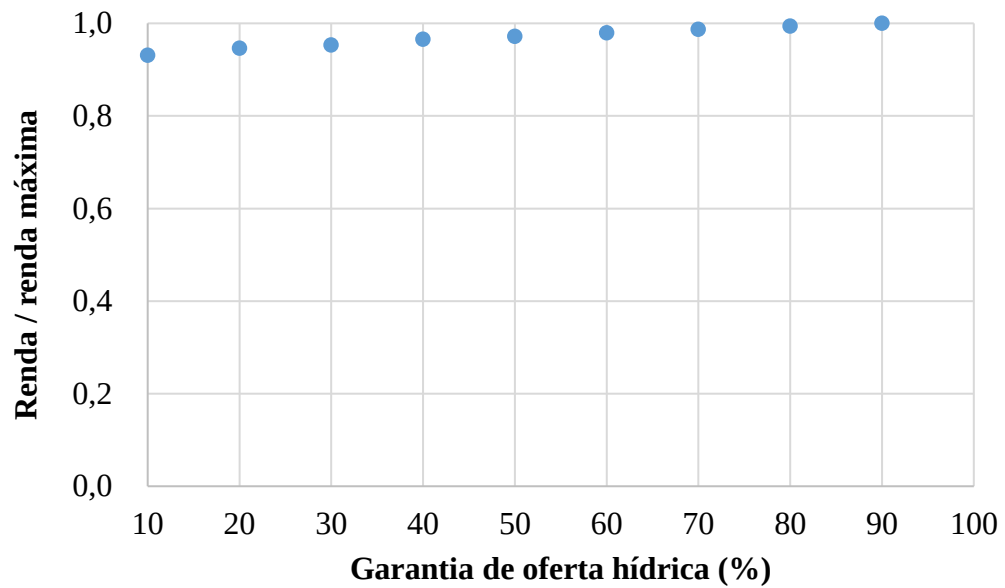
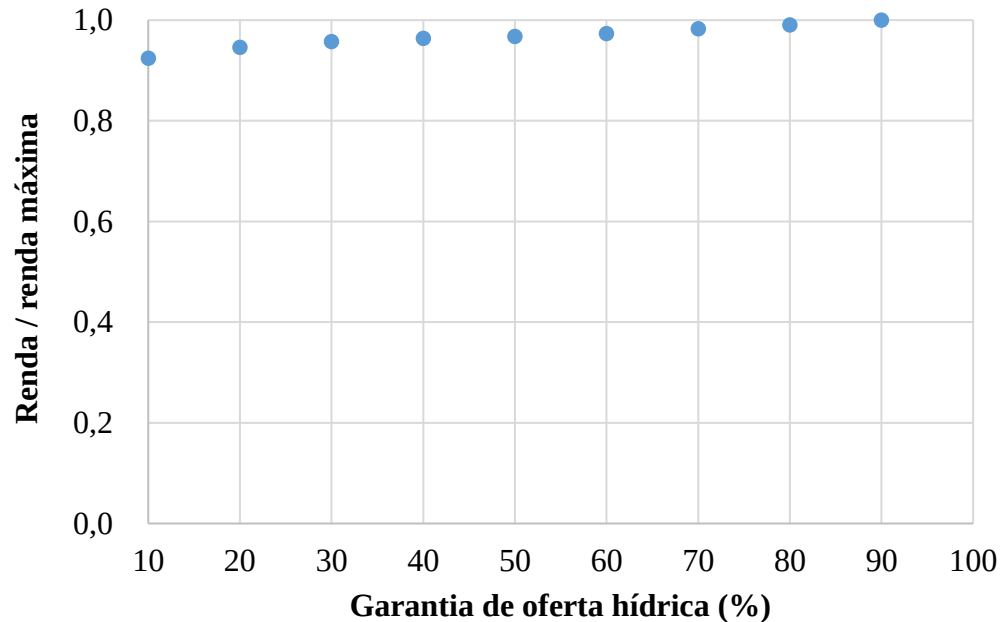


Figura 18 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Buri para 20% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



As Figuras 19 e 20 apresentam as rendas máximas possíveis nos açudes Brisa-mar e Buri para diferentes áreas de placas fotovoltaicas flutuantes.

No açude Brisa-mar, a comparação entre a renda máxima sem placas fotovoltaicas flutuantes e com apenas 2% da área com cobertura de placas fotovoltaicas indica um aumento da renda máxima em aproximadamente 10 vezes. O aumento da renda é proporcional ao

aumento da área de placas, pois a renda da energia produzida já é muito maior que a renda da produção agrícola com apenas 2% de cobertura.

A mesma situação se repete no açude Buri, mas em proporções menores. Isso ocorre, pois a área de superfície máxima do açude Brisa-mar é 30% maior, consequentemente a área absoluta de placas fotovoltaicas e, portanto, a renda proveniente da geração de energia, é maior em relação ao açude Buri.

É importante mencionar que, em uma condição de elevada variabilidade hidrológica, que impõe restrições à atividade agrícola, a geração de energia com placas flutuantes nos açudes é uma atividade muito mais rentável. Por outro lado, o investimento nas placas é muito maior do que na implantação de um sistema de irrigação.

Figura 19 – Renda mensal máxima do açude Brisa-mar para diferentes percentuais da área do açude coberta por placas fotovoltaicas flutuantes

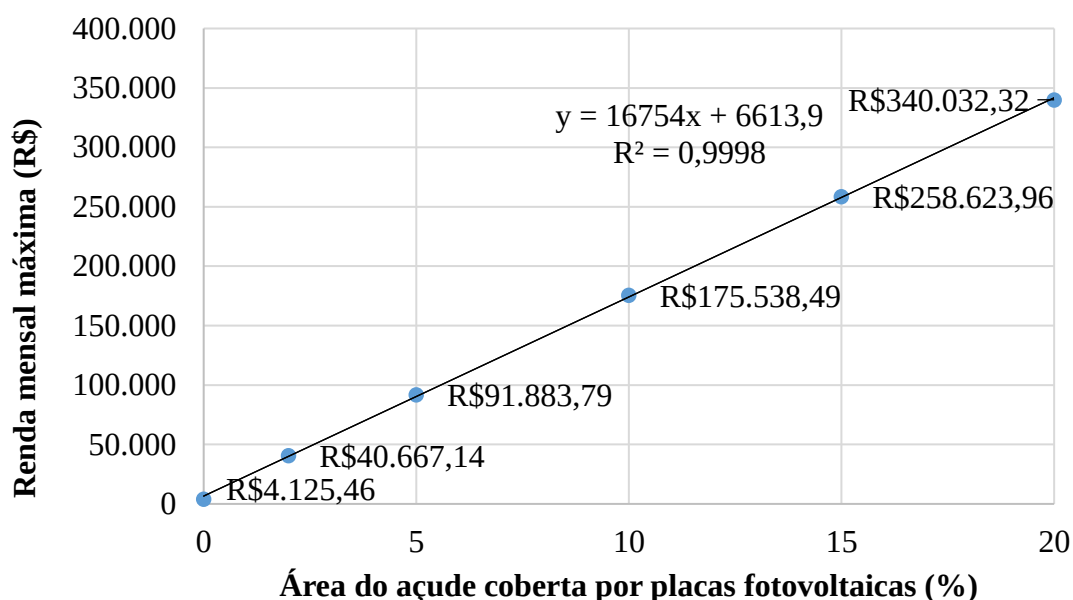
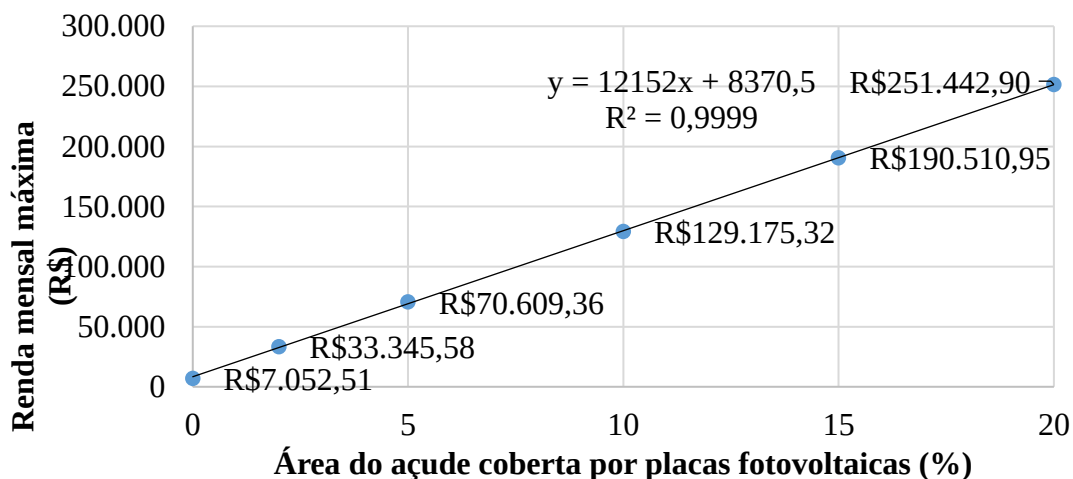


Figura 20 – Renda mensal máxima do açude Buri para diferentes percentuais da área do açude coberta por placas fotovoltaicas flutuantes



4.2 Açudes Serra Azul e Sitio dos Macacos (capacidades de aproximadamente 340 mil m³)

Para efeito de comparação entre açudes de volumes diferentes, os outros dois açudes escolhidos são de menor capacidade, os quais mais se adequam com as características da maior quantidade de açudes no semiárido brasileiro: área e volume pequenos e intermitentes.

Seguindo o mesmo padrão de simulações, nas Figuras 21 e 22 estão os valores apenas da renda da agricultura, sem o uso de placas fotovoltaicas. Diferentemente dos açudes Brisamar e Buri, a faixa de maior renda agrícola permaneceu entre 30% e 40% de garantia hídrica no açude Serra Azul. Já no açude Sitio dos Macacos a faixa de maior renda ficou entre 20% a 40% de garantia hídrica, pois é localizado em uma área semiárida possuindo uma maior taxa de evaporação, o que faz com que seja necessária uma utilização um pouco mais intensa da água para agricultura.

A margem de renda máxima mudou porque as áreas máximas de superfície dos açudes são menores, assim a quantidade de água que será evaporada é menor em comparação aos outros dois maiores açudes, assim podendo armazenar a água por mais tempo.

Figura 21 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 0% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

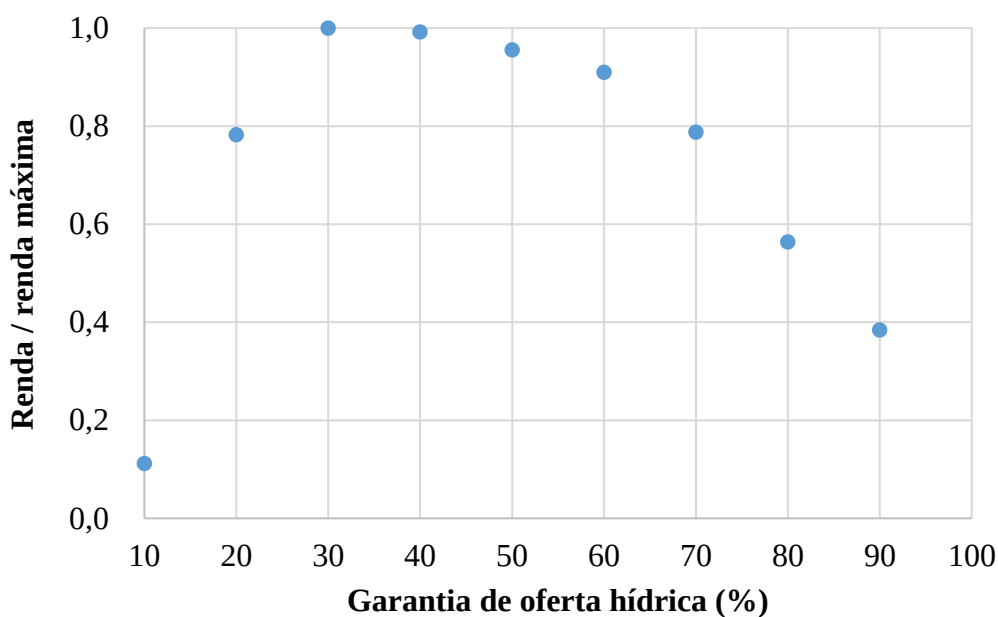
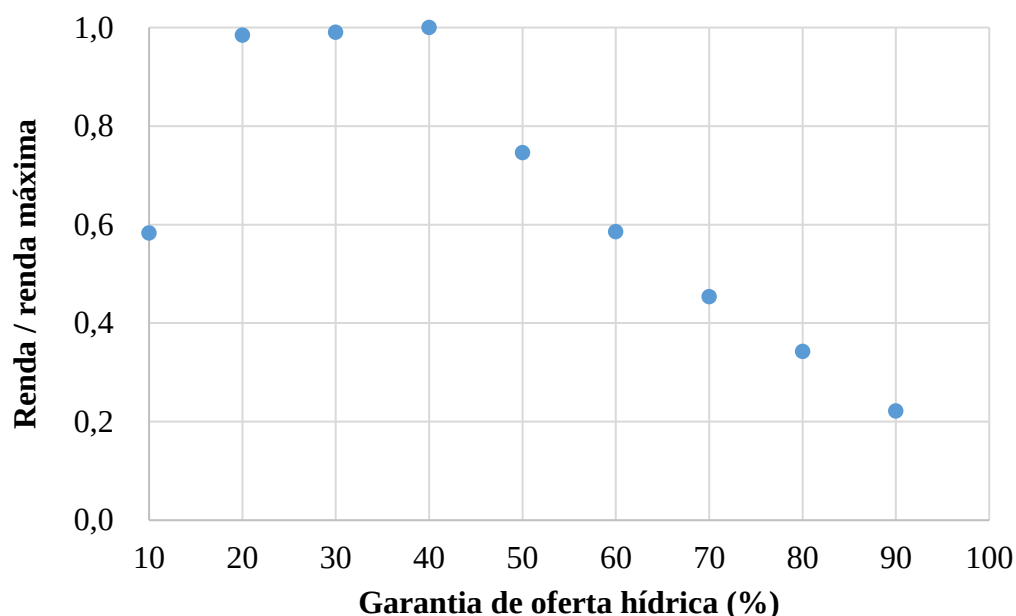


Figura 22 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 0% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



O mesmo padrão das curvas se repete ao inserir 2% de cobertura no açude. O açude Serra Azul continua na faixa de 30% a 40% da garantia hídrica e o açude Sítio dos macacos na faixa de 20% a 40%.

Se comparado com os maiores açudes, nas Figuras 23 e 24 nota-se que com apenas 2% de cobertura a renda oriunda da energia produzida não é tão maior que a da agricultura, assim seguindo a mesma curvatura do gráfico sem placas fotovoltaicas.

Figura 23 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 2% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes.

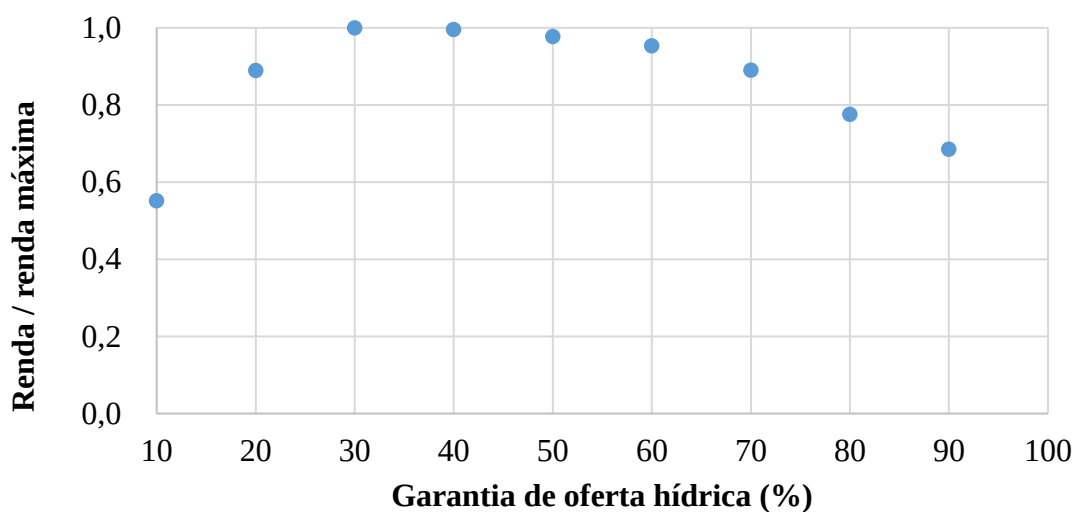
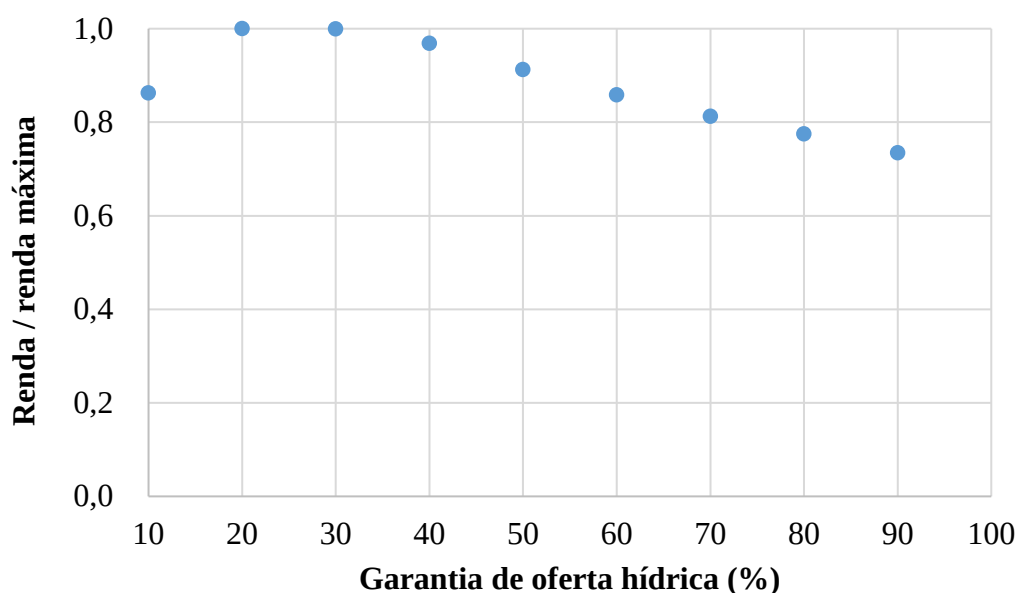


Figura 24 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 2% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



A partir de 5% de cobertura, a curva dá um início de um padrão retilíneo mais forte no açude Sítio dos Macacos, onde todas as relações de renda sobre renda máxima já ficam acima de 0,8, já no açude Serra azul a curva diminui mais lentamente.

As Figuras 25 e 26 mostram que a melhor relação de renda de ambos os açudes ainda continua com a disponibilidade hídrica entre 20% e 40% de garantia, o que define que ainda compensa ter um uso moderado e constante da água para a produção agrícola, pois com a área pequena de cobertura de placas o esvaziamento do açude não afeta tanto a produção de energia.

Figura 25 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

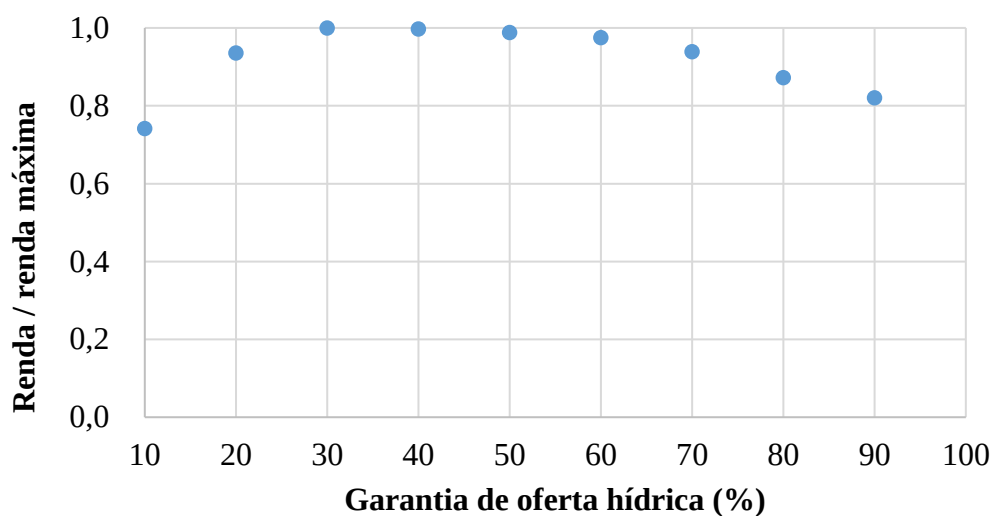
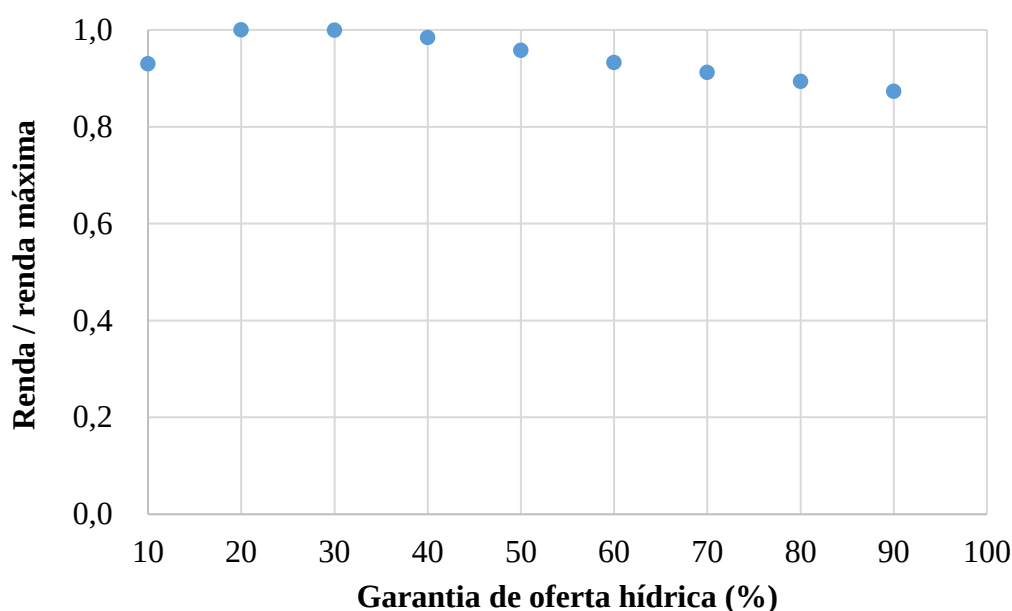


Figura 26 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 5% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



Nas Figuras 27 e 28 pode-se observar que a curva começa a ficar praticamente paralela ao eixo horizontal do gráfico. Ao comparar com a mesma porcentagem de cobertura dos açudes Brisa-mar e Buri, é possível diferenciar o padrão da relação das rendas, onde nos açudes maiores, por ter uma grande área máxima do açude, a produção de energia solar a partir de 10% de cobertura começa a se sobressair bastante, ao ponto de economicamente ser mais vantajoso segurar toda a água possível para que gere mais energia.

Nos açudes menores esse fato não ocorre, pois como a área máxima do açude é menor, a produção de energia não se torna a prioridade pois as maiores rendas ainda continuam entre 20% a 40% de garantia hídrica.

Figura 27 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 10% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

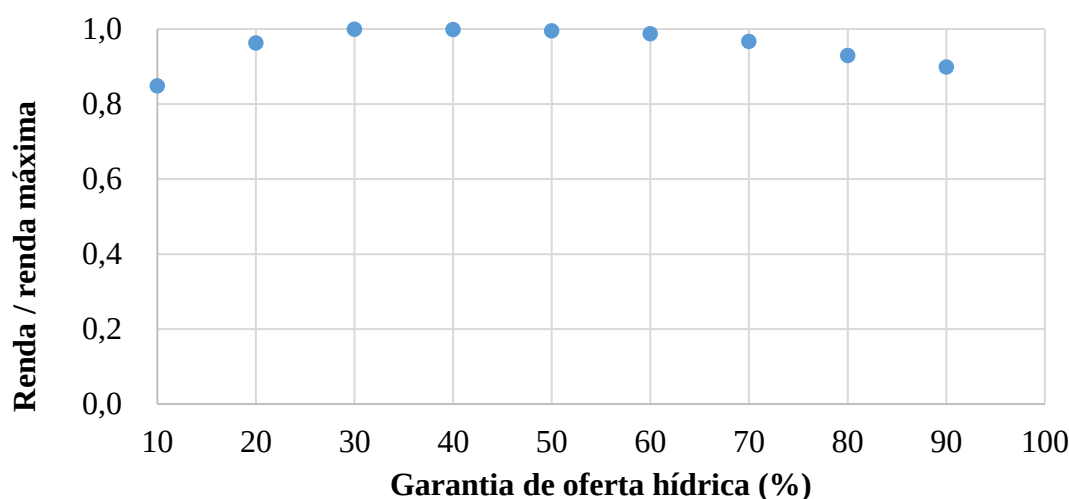
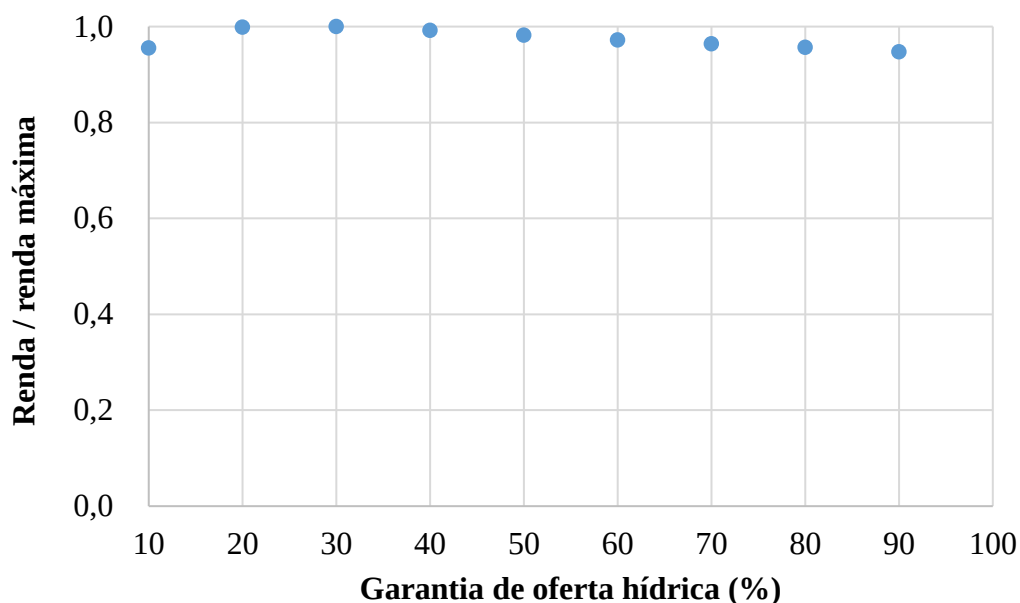


Figura 28 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 10% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



Nas Figuras 29 e 30 é visível que o padrão do aumento de cobertura continua em cada açude com a utilização de 15%, o que difere dos gráficos anteriores.

No açude Serra Azul o intervalo próximo da renda máxima aumentou de 30% a 40% para 30% a 60% de garantia, assim obtendo uma boa variedade de utilização da água sem muita alteração na renda. Já no açude Sítio dos Macacos essa variedade foi bem mais ampla, onde a partir de 20% de garantia hídrica, a renda se manteve praticamente igual.

Figura 29 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 15% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

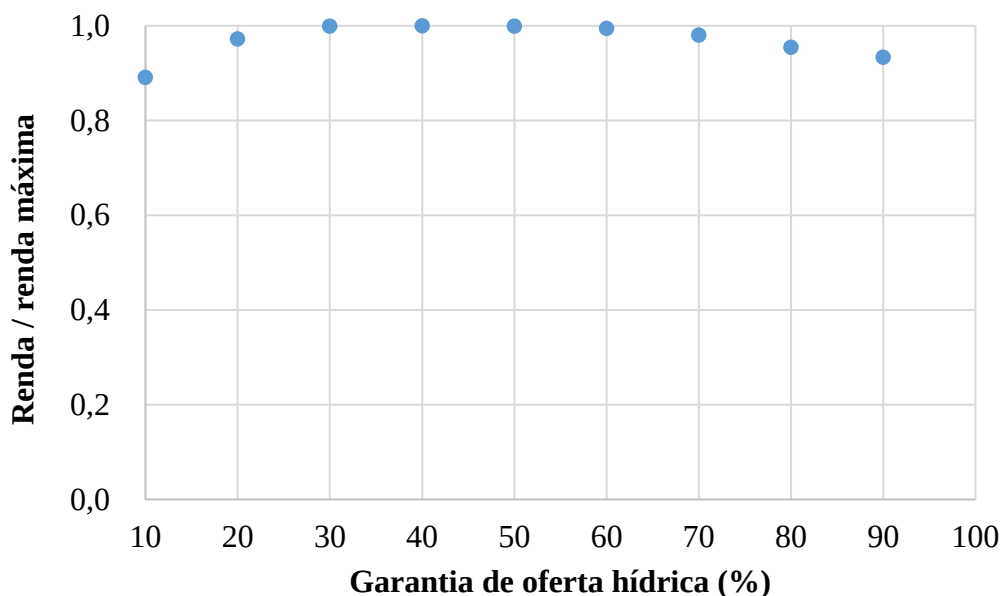
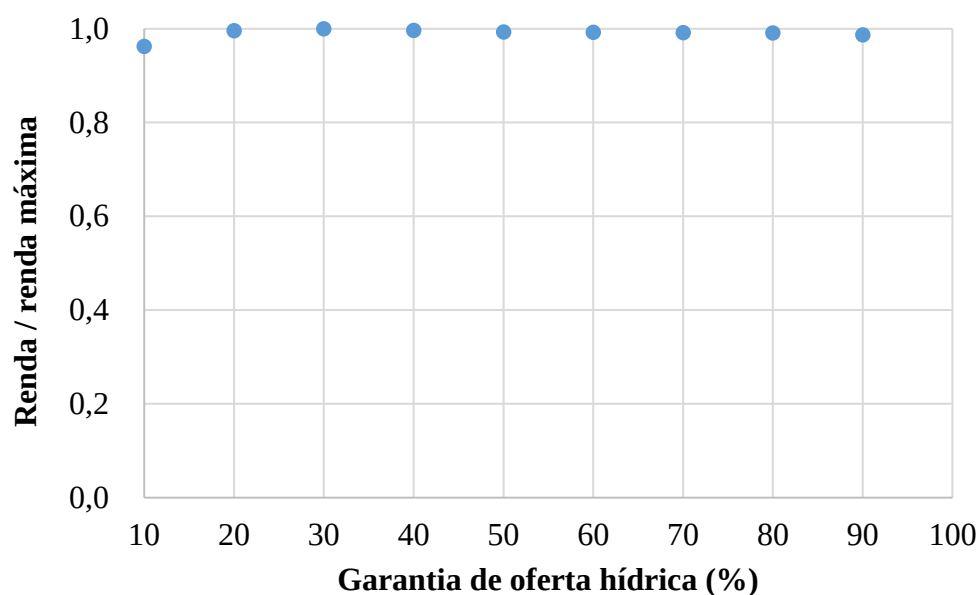


Figura 30 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 15% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



Finalizando os dados obtidos com a relação da renda com a garantia de oferta hídrica, as Figuras 31 e 32 mostram que, em relação à garantia que gera a renda máxima, não difere muito a utilização de 20% para 15% de cobertura. O que se destacou mais nesses gráficos foi o açude Sítio dos Macacos, o qual a renda máxima foi com 90% de garantia hídrica, mostrando que a partir desta cobertura de painéis, quanto mais tempo armazenar a água no recurso hídrico, maior será a renda.

Figura 31 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Serra Azul para 20% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes

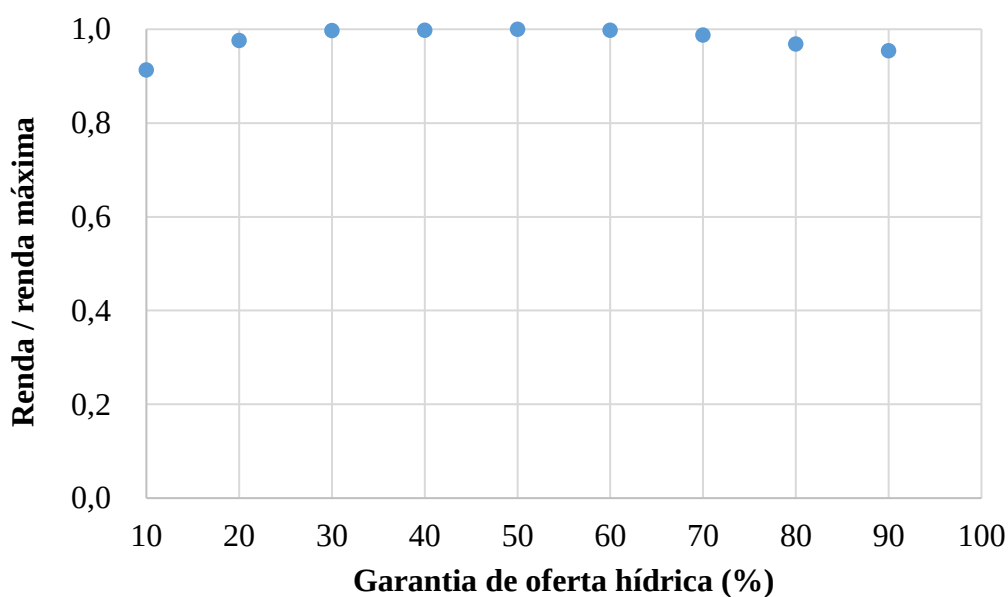
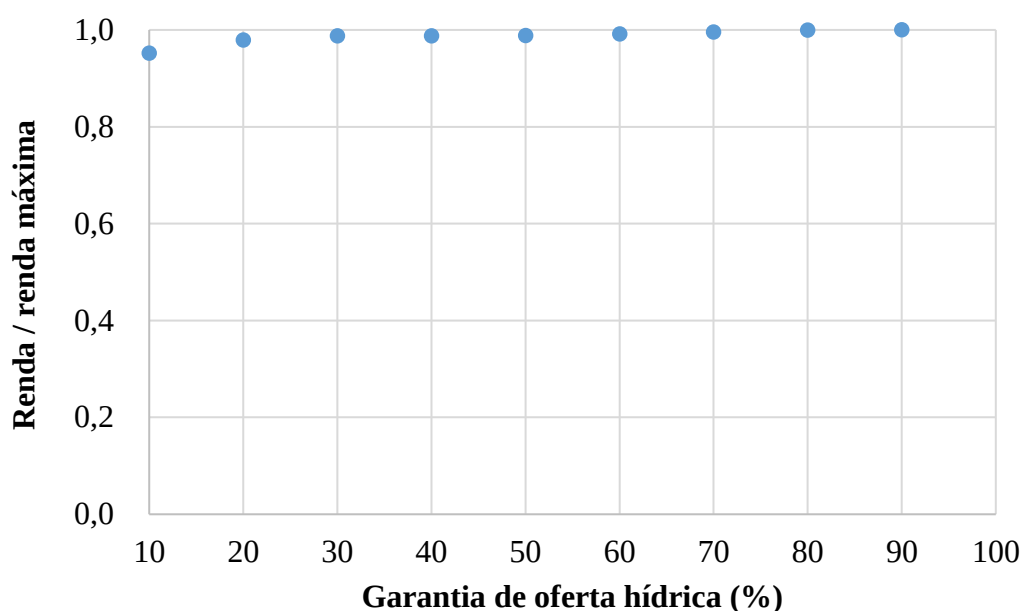


Figura 32 – Renda versus garantia de fornecimento hídrico do açude Sítio dos Macacos para 20% de cobertura por placas fotovoltaicas flutuantes



Nas Figuras 33 e 34 é feita a relação da renda máxima para cada área de placas fotovoltaicas flutuantes utilizadas nos açudes Serra Azul e Sítio dos Macacos. Foi visto que a relação da renda de 0% e 2% de cobertura do açude Brisa-mar por placas fotovoltaicas foi de dez vezes. Já no açude Serra Azul, também em região mais úmida, a mesma relação foi de apenas duas vezes maior. Como a renda geral é diretamente proporcional à área de placas, o mesmo padrão foi obtido nas porcentagens de coberturas restantes.

A mesma situação se repete no açude Sítio dos Macacos, mas em proporções menores, o qual diminuiu a relação de cinco vezes para apenas três vezes maior.

Figura 33 – Renda mensal máxima do açude Serra Azul para diferentes percentuais da área do açude coberta por placas fotovoltaicas flutuantes

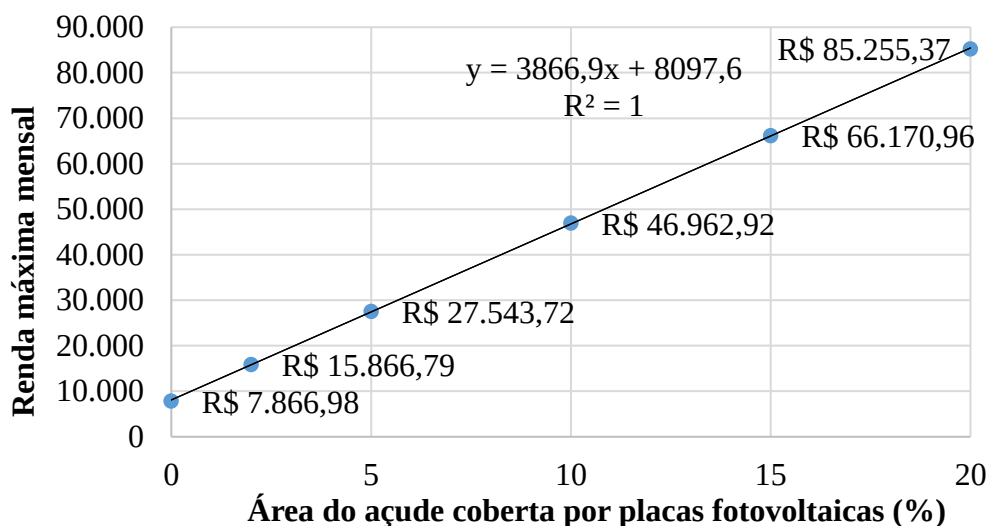
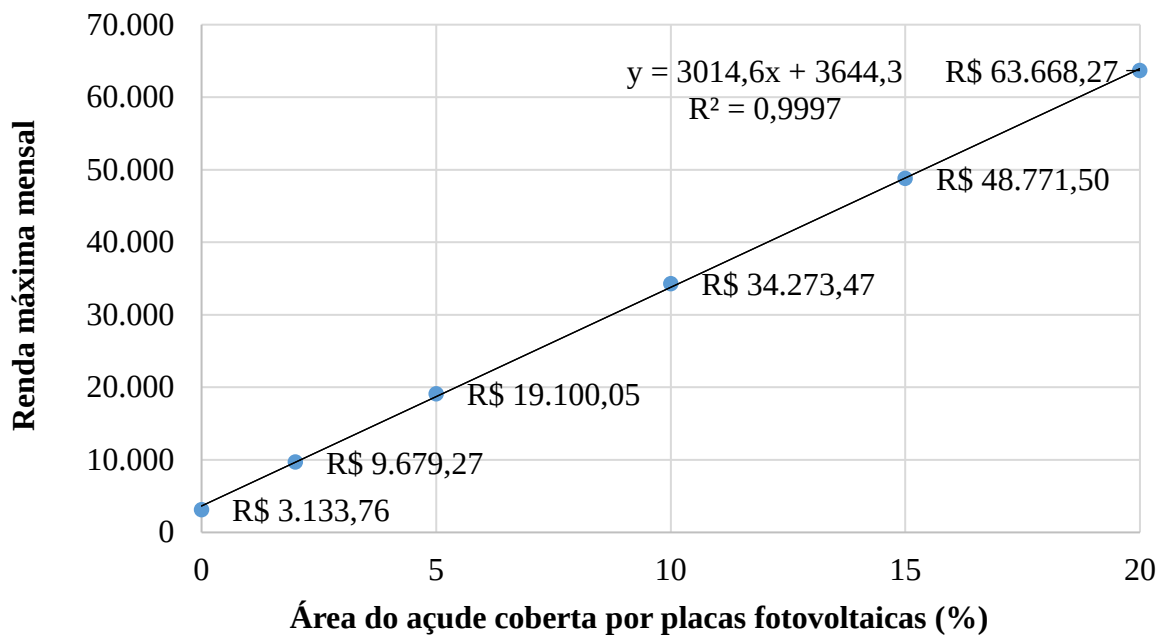


Figura 34 – Renda mensal máxima do açude Sítio dos Macacos para diferentes percentuais da área do açude coberta por placas fotovoltaicas flutuantes



4.3 Renda máxima obtida da atividade agrícola e produção de energia fotovoltaica nos açudes simulados

Para facilitar a comparação das rendas dos quatro açudes, a Tabela 2 apresenta os resultados de renda máxima para cada cobertura de placas fotovoltaicas utilizada nas simulações realizadas com o modelo NeStRes modificado.

Ao comparar os valores da renda máxima apenas da produção agrícola, ou seja, com 0% de cobertura com placas fotovoltaicas flutuantes, as regiões semiáridas ocorreram como o esperado: o açude Buri, por ter maior capacidade de armazenamento de água comparado com o açude Sítio dos Macacos, foi obtida uma renda superior, pois com maior utilização da água maior será a produção agrícola.

Já nas regiões úmidas esse efeito ocorreu ao contrário. A renda máxima da agricultura do açude Serra Azul foi maior que do açude Brisa-mar, mesmo tendo uma capacidade de armazenamento de água aproximadamente cinco vezes menor. Isso ocorreu porque a área da bacia hidrográfica do açude Serra Azul é aproximadamente três vezes maior, o que produz um maior enchimento do açude e possibilita uma maior área para atividade agrícola, comparado com a bacia hidrográfica do açude Brisa-mar.

A partir de 2% de cobertura dos açudes com painéis fotovoltaicos flutuantes, os maiores açudes obtiveram uma maior renda comparado com os menores açudes devido a maior área máxima de superfície. Além disso, o crescimento da renda máxima foi diretamente proporcional ao aumento da porcentagem de cobertura.

Ao fazer uma comparação entre as regiões com variações climáticas, pode-se observar que as rendas máximas das regiões mais úmidas são maiores. Isso ocorre porque a taxa de evaporação das regiões semiáridas é maior, proporcionando o esvaziamento total do açude mais rapidamente, consequentemente diminuindo a renda da energia produzida, pois as placas ficam sobre o solo por mais tempo.

Tabela 2 – Renda máxima obtida da atividade agrícola e produção de energia fotovoltaica nos açudes simulados, relacionada ao percentual de cobertura dos açudes por painéis fotovoltaicos flutuantes

Regiões	Cobertura (%)	Renda Máxima	
		Açudes $\pm$ 300.000 m ³	Açudes $\pm$ 1.000.000 m ³
		Serra Azul	Brisa-mar
Úmidas	0	R\$ 7.866,98	R\$ 4.125,46
	2	R\$ 15.866,79	R\$ 40.667,14
	5	R\$ 27.543,72	R\$ 91.883,79
	10	R\$ 46.962,92	R\$ 175.538,49
	15	R\$ 66.170,96	R\$ 258.623,96
	20	R\$ 85.255,37	R\$ 340.032,32
		Sítio dos Macacos	Buri
Semiáridas	0	R\$ 3.133,76	R\$ 7.052,51
	2	R\$ 9.679,27	R\$ 33.345,58
	5	R\$ 19.100,05	R\$ 70.609,36
	10	R\$ 34.273,47	R\$ 129.175,32
	15	R\$ 48.771,50	R\$ 190.510,95
	20	R\$ 63.668,27	R\$ 251.442,90

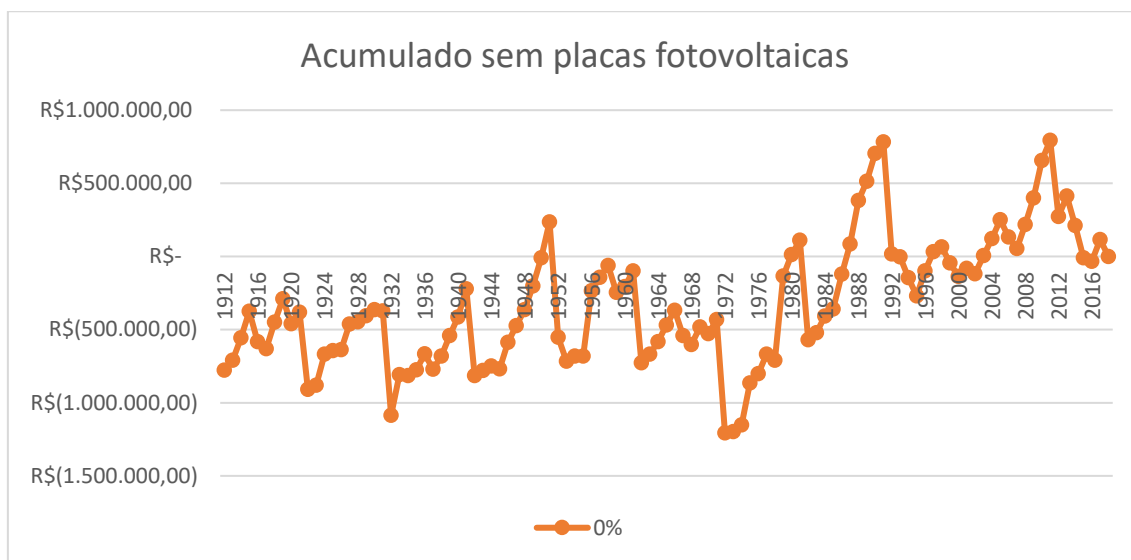
4.4 Fluxos de caixas anuais

Ao final de todas as simulações financeiras comparativas entre os açudes foi feita uma foi realizada uma avaliação dos acumulados dos fluxos de caixas, no início de cada ano, para que fosse possível observar a diferença entre fluxo com apenas a produção agrícola e com a união de produção de energia.

Considerando apenas a produção agrícola no açude Brisamar (Figura 35), pode ser observada instabilidade e imprevisibilidade do fluxo de caixa. Isso ocorre porque a produção tem como dependente principal a disponibilidade hídrica da região, que apresenta elevada variabilidade.

No ano que tem uma alta pluviosidade, consequentemente há uma grande produção de alimentos e aumento do fluxo de caixa. Mas quando há anos com poucas chuvas, o saldo acumulado passa a ser negativo. Vale ressaltar que no início do período de simulação há o investimento para o sistema de irrigação da cultura, por isso já inicia no negativo.

Figura 35 – Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano apenas com a produção agrícola no açude Brisamar



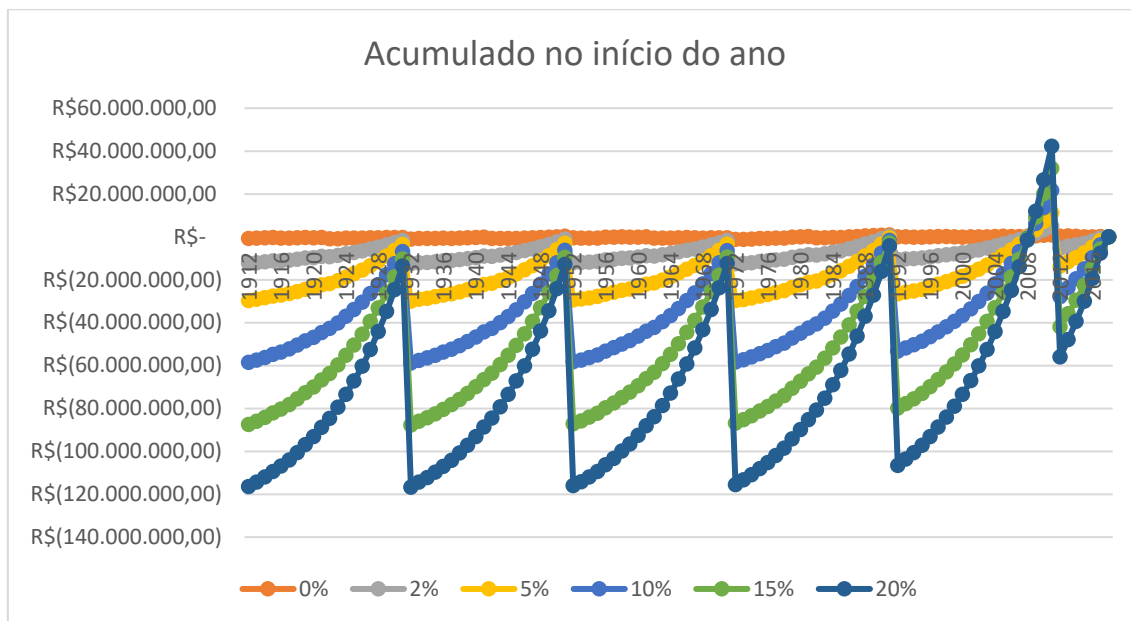
Quando são inseridas placas fotovoltaicas (Figura 36), já se pode ver a diferença na previsibilidade do fluxo de caixa. Considerando o tempo de vida das placas fotovoltaicas em torno de 20 anos, então sempre nesse período é feito um investimento para repor o sistema fotovoltaico. Além disso todo ano é necessária uma manutenção preventiva.

A simulação foi designada para o balanço zerar no último ano, por esse motivo a curva do gráfico na maioria do tempo fica no negativo, pois ao ser definida essa condição, o modelo calcula qual a maior renda possível que o agricultor ou empresa pode receber todo mês, independente se o caixa está no positivo ou negativo.

Seguindo outro modelo econômico, por exemplo, não se retirando a renda máxima possível todos os meses da simulação, o acumulado no final de todos os anos já passa a ser muito elevado. Isso ocorre por que enquanto o fluxo estiver no negativo é aplicada uma taxa e juros, assim aumentando a dívida de modo geral e o tempo em que o balanço é negativo.

Mas a conclusão principal que pode ser observada nessa comparação é a diferença de previsibilidade entre um sistema apenas com produção agrícola e um sistema com a junção de produção de energia solar. Pode-se ver que as curvas dos fluxos das placas fotovoltaicas são bem uniformes, o que pode demonstrar ao agricultor ou empresa o que será produzido nas próximas décadas.

Figura 36 – Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano no açude Brisamar considerando diferentes percentuais de cobertura do açude por placas fotovoltaicas



O mesmo padrão pode ser visto nos açudes Buri, Sítio dos Macacos e Serra Azul (Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42). O que difere são as grandezas das escalas econômicas devido ao tamanho da área máxima de irrigação e da superfície do açude, pois quanto maior a área, maior será o sistema de irrigação e a planta fotovoltaica exigindo um maior investimento inicial.

Figura 37 – Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano apenas com a produção agrícola no açude Buri

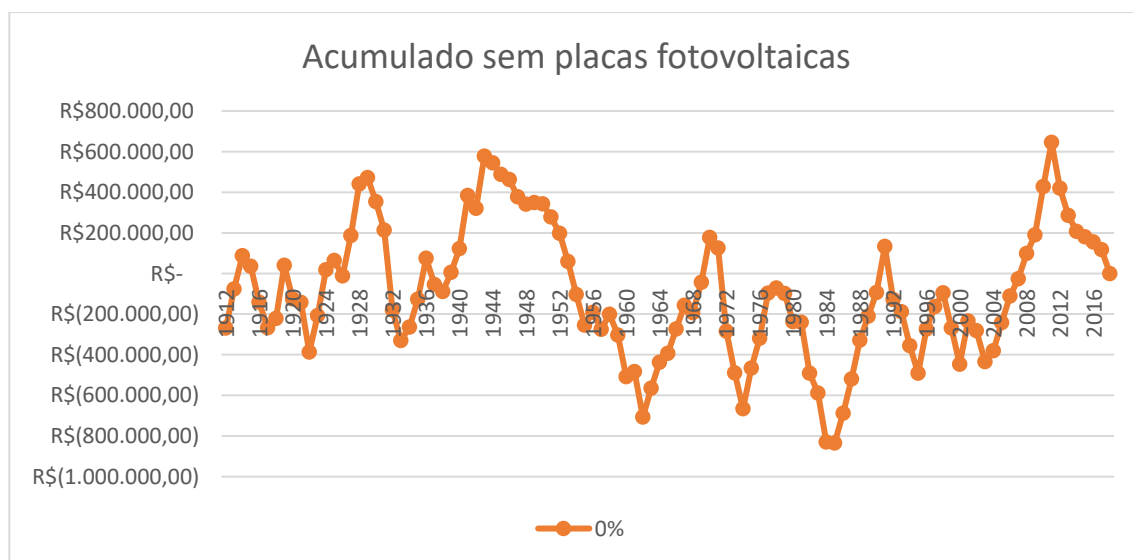


Figura 38 – Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano no açude Buri considerando diferentes percentuais de cobertura do açude por placas fotovoltaicas

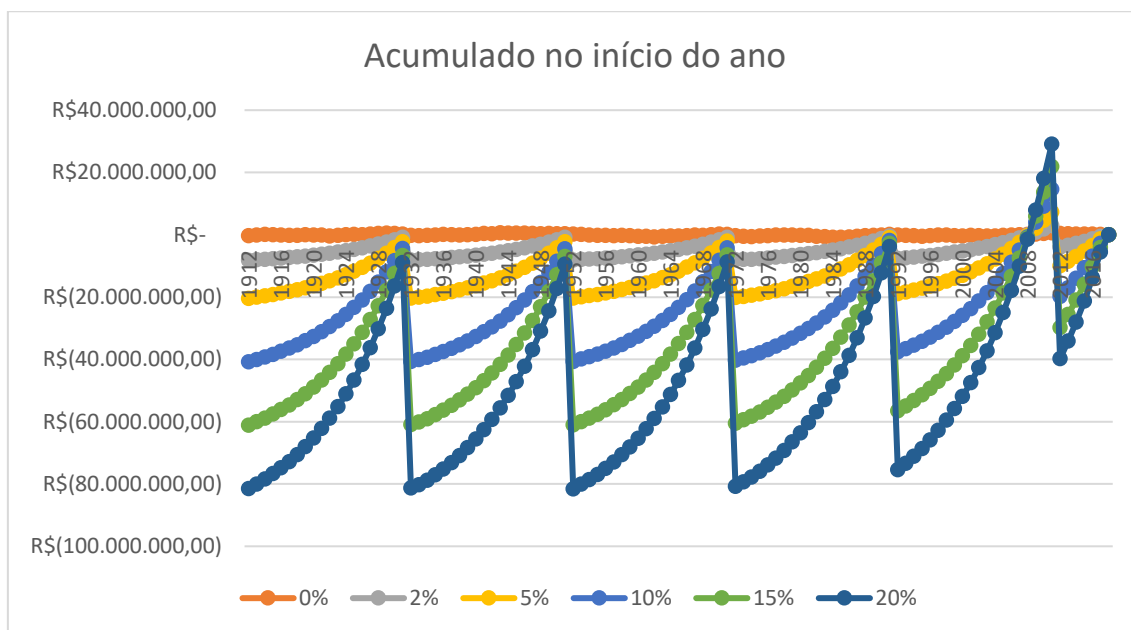


Figura 39 – Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano apenas com a produção agrícola no açude Serra Azul

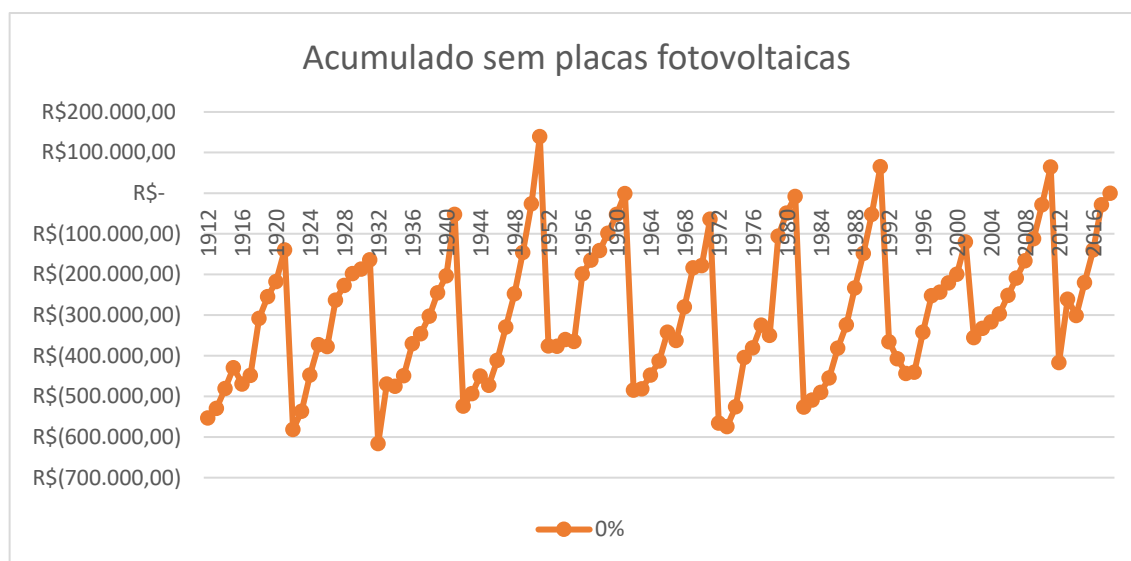


Figura 40 – Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano no açude Serra Azul considerando diferentes percentuais de cobertura do açude por placas fotovoltaicas

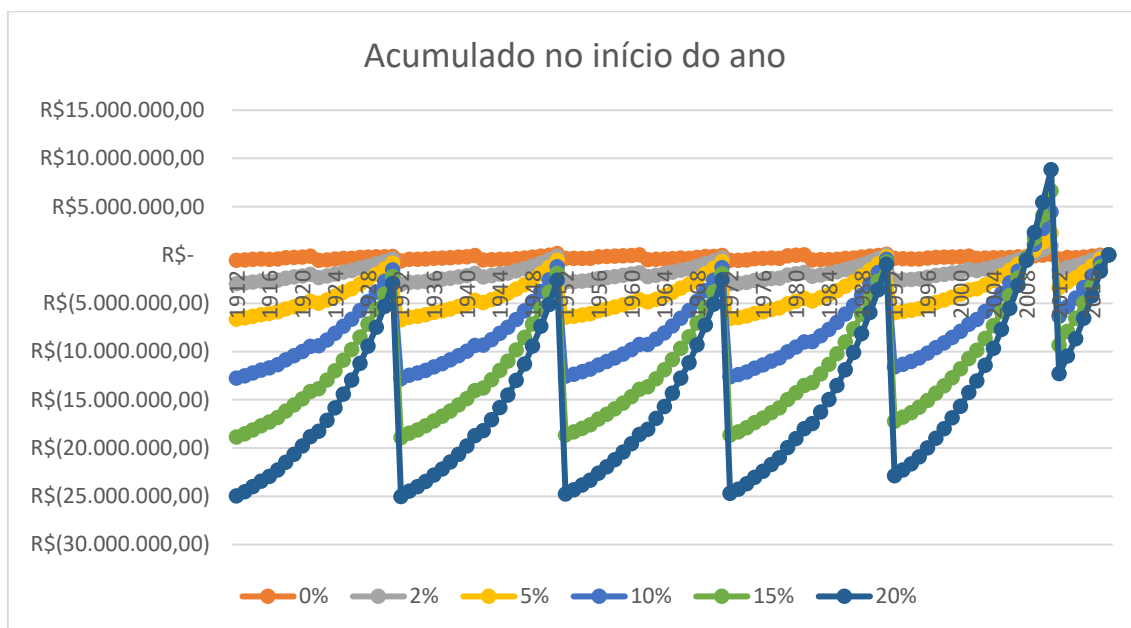


Figura 41 – Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano apenas com a produção agrícola no açude Sítio dos Macacos

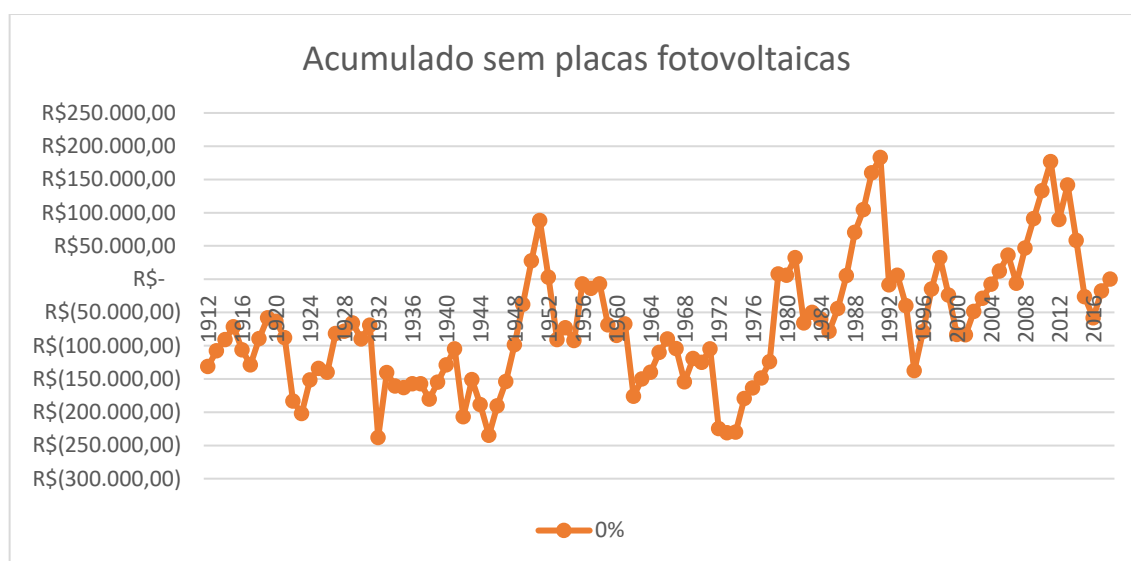
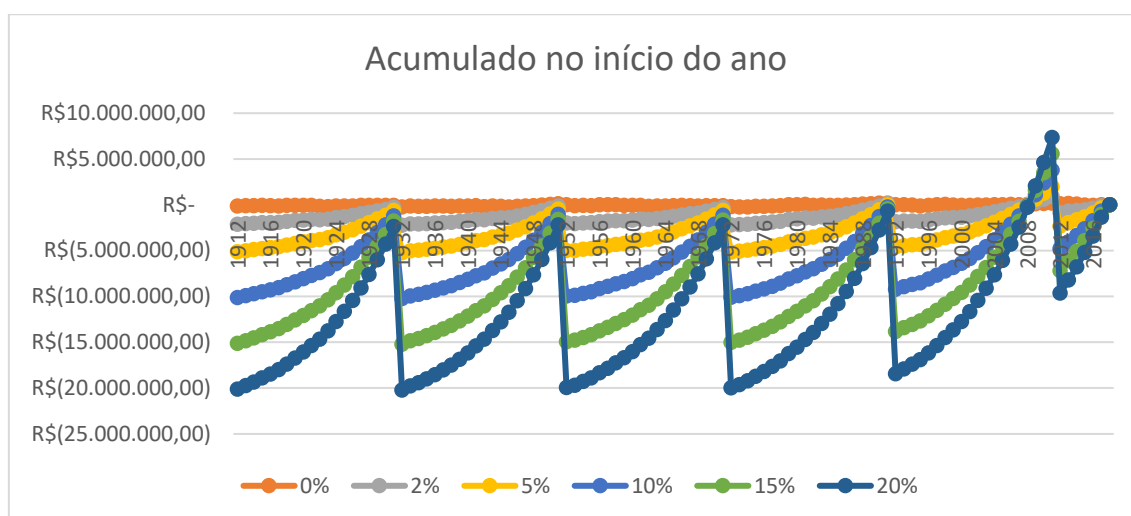


Figura 42 – Fluxo de caixa, com os acumulados no início de cada ano no açude Sítio dos Macacos considerando diferentes percentuais de cobertura do açude por placas fotovoltaicas



5 CONCLUSÃO

O modelo NeStRes, desenvolvido para indicar o uso de água de pequenos açudes que maximize a renda proveniente da agricultura irrigada, foi modificado neste estudo para simular a produção de energia por painéis fotovoltaicos flutuantes em pequenos açudes. A coprodução de alimentos e energia é relevante para o semiárido brasileiro, tendo em vista a enorme quantidade de pequenos açudes na região e sua variabilidade hidrológica, que afeta a produção agrícola e de energia com painéis fotovoltaicos.

Com a geração fotovoltaica flutuante, a regra de operação do açude que maximiza a renda muda: somente com a atividade agrícola, a renda é máxima quando a água é usada intensamente, o que provoca uma redução das perdas por evaporação. Com a introdução das placas, a renda máxima é obtida quando se mantém a água por mais tempo no açude, ou seja, reduzindo o uso da água na agricultura, para que os painéis permaneçam sobre a água e sejam resfriados, o que aumenta a eficiência na geração de energia.

Ao se introduzir painéis fotovoltaicos flutuantes em um pequeno açude, a renda obtida a partir do açude apresenta uma elevação muito brusca, indicando que a geração de energia é muito mais rentável do que a atividade agrícola. Mesmo com apenas 2% de cobertura de placas na superfície do açude, a renda pode aumentar em cinco vezes, na média.

Ao comparar os acumulados dos fluxos de caixa anuais, é visível a diferença da previsibilidade quando é introduzido um sistema fotovoltaico flutuante no pequeno açude. Com o uso da água apenas para a agricultura, a receita do produtor está sempre relacionada à disponibilidade hidrológica, que depende do regime pluviométrico altamente variável. Já com as placas fotovoltaicas flutuantes, o cenário muda para fluxo de caixa mais previsível, uma vez que energia é gerada mesmo com o açude seco, ainda que com eficiência um pouco menor.

A atividade de produção de energia fotovoltaica em pequenos açudes tem uma elevada rentabilidade no semiárido cearense devido à alta incidência solar e pela quantidade de pequenos açudes, mas exige um elevado investimento inicial para ser implantado.

O setor agrícola é muito forte no Ceará, o qual uma parte é associada à agricultura de subsistência de pequenos agricultores, que inviabiliza o uso de um pequeno açude apenas para a produção de energia, visto que muitas famílias dependem dessa mesma água para sobreviver e produzir alimentos, contribuindo para a segurança alimentar da região. Além disso, é essencial manter essa prática agrícola para assegurar a fonte de alimentos da região e não afetar desfavoravelmente o mercado alimentício.

REFERÊNCIAS

- ABDUL, S. et al. *Water-Energy-Food Nexus: Principles and Practices*. 1st ed. Wiley, 2017.
- AGOSTINI, A.; COLAUZZI, M.; AMADUCCI, S. Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. *Applied Energy*, v. 281, n. June 2020, p. 116102, 2021.
- AL-AGELE, H. A. et al. A case study of tomato (*Solanum lycopersicon* var. legend) production and water productivity in agrivoltaic systems. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 5, p. 1–13, 2021.
- ALLOUCHE, J.; MIDDLETON C.; GYAWALI D. A dynamic approach to security and sustainability in the water-energy-food nexus. Brighton: STEPS Centre. Working Paper 63, 2015.
- AMADUCCI, S.; YIN, X.; COLAUZZI, M. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, v. 220, n. January 2018, p. 545–561, 2018.
- ANDREW, A. C. et al. Herbage Yield, Lamb Growth and Foraging Behavior in Agrivoltaic Production System. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 5, n. April, p. 1–12, 2021.
- ASSOULINE, S.; NARKIS, K.; OR, D. Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers. *Water Resources Research*, v. 47, n. 7, p. 1–8, 2011.
- BARRON-GAFFORD, G. A. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, v. 2, n. 9, p. 848–855, 2019.
- BEZERRA, B. G.; LUCIO, P. S.; BARBOSA, L. D. M. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ Caracterização dos Padrões de Precipitação no Semiárido Brasileiro. v. 41, p. 397–409, 2018.
- BRASIL, P.; Modelo Físico-Matemático para alocação de água de pequenos reservatórios na agricultura irrigada em regiões secas (NeStRes). Tese (Doutorado em Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará. Orientador: Pedro Medeiros. Fortaleza, 2021.
- BRASIL, P.; MEDEIROS, P. NeStRes – Model for Operation of Non-Strategic Reservoirs for

Irrigation in Drylands: Model Description and Application to a Semiarid Basin. *Water Resources Management*, v. 34, n. 1, p. 195–210, 2020.

BRASIL, P. et al. Regional operation criteria for non-strategic reservoirs in drylands to maximize farmer income from irrigation: role of the hydrological regime. *Water Resources Management*, 2021.

CL, A. et al. Análise da viabilidade econômica da implantação de um sistema fotovoltaico em uma edificação pública na cidade de Jaguaruana-CE. n. 1, p. 1–15, 2015.

CAVALCANTE, Y. S. Análise do potencial de plantas fotovoltaicas flutuantes em açudes do Ceará. Trabalho de conclusão de curso. *Energias Renováveis*, 2018.

DE ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil. *Water International*, v. 41, n. 2, p. 213–230, 2016.

DINESH, H.; PEARCE, J. M. The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 299–308, 2016.

DO Sacramento, E. M. et al. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. *IET Renewable Power Generation*, 9(8), 1019-1024, 2015.

DUPAR, M; OATES, N. Getting to grips with the water-energy-food ‘nexus’. *Climate and Development Knowledge Network*, London, 2012.

EMBRAPA. VISÃO 2030 O Futuro da Agricultura Brasileira. Brasília, DF, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050: NOTA TÉCNICA PR 04/18. Série RECURSOS ENERGÉTICOS. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2018.

ENDO, A. et al. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 11, p. 20–30, 2017.

FARFAN, J.; BREYER, C. Combining floating solar photovoltaic power plants and hydropower reservoirs: A virtual battery of great global potential. *Energy Procedia*, v. 155, p. 403–411, 2018.

GLASSMAN, *et al.* The water-energy nexus. A World Policy Institute, 2011.

HECKMAN, J. J. et al. 済無No Title No Title No Title. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., p. 5–24, 1967.

HOFF, H. Understanding the Nexus, Background Paper for the Bonn 2011 Conference: the Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm, 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA). Setembro de 2021.

KADDOURA, S.; EL KHATIB, S. Review of water-energy-food Nexus tools to improve the Nexus modelling approach for integrated policy making. *Environmental Science and Policy*, v.

77, n. May, p. 114–121, 2017.

LIU, J. et al. Challenges in operationalizing the water–energy–food nexus. *Hydrological Sciences Journal*, v. 62, n. 11, p. 1714–1720, 2017.

LOPES, M.P.C. Water-energy nexus: Floating photovoltaic systems promoting water security and energy generation in the semiarid region of Brazil. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier. v. 273, 2020.

MALU, P. R.; SHARMA, U. S.; PEARCE, J. M. Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 23, n. April, p. 104–110, 2017.

MARROU, H. Co-locating food and energy. *Nature Sustainability*, v. 2, n. 9, p. 793–794, 2019.

MEDEIROS, P. H. A.; DE ARAÚJO, J. C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. *Journal of Soils and Sediments*, v. 14, n. 7, p. 1216–1223, 2014.

MEDEIROS, P.; SIVAPALAN, M. From hard-path to soft-path solutions: slow–fast dynamics of human adaptation to droughts in a water scarce environment. [s.l.] Taylor & Francis, 2020. v. 65

MIDDLETON, C. et al. The rise and implications of the water-energy-food nexus in Southeast Asia through an environmental justice lens. *Water Alternatives*, v. 8, n. 1, p. 627–654, 2015.

MISKIN, C. K. et al. Sustainable co-production of food and solar power to relax land-use constraints. *Nature Sustainability*, v. 2, n. 10, p. 972–980, 2019.

NAMANY, S.; AL-ANSARI, T.; GOVINDAN, R. Optimisation of the energy, water, and food nexus for food security scenarios. *Computers and Chemical Engineering*, v. 129, p. 106513, 2019.

NASCIMENTO, A. T. P. DO et al. Decentralized water supply by reservoir network reduces power demand for water distribution in a semi-arid basin. *Hydrological Sciences Journal*, v. 64, n. 1, p. 80–91, 2019.

PADILHA CAMPOS LOPES, M. et al. Water-energy nexus: Floating photovoltaic systems promoting water security and energy generation in the semiarid region of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 273, 2020.

PARKINSON, S.; HUNT, J. Economic Potential for Rainfed Agrivoltaics in Groundwater-Stressed Regions. *Environmental Science and Technology Letters*, v. 7, n. 7, p. 525–531, 2020.

PORTO, Y. et al. Viabilidade técnica para implantação de um sistema solar fotovoltaico flutuante em um reservatório do semiárido brasileiro. *Revista Tecnologia*, v. 38, n. 2, p. 1–11, 2017.

RODRIGUES, I. S.; RAMALHO, G. L. B.; MEDEIROS, P. H. A. Potential of floating photovoltaic plant in a tropical reservoir in Brazil. *Journal of Environmental Planning and Management*, v. 63, n. 13, p. 2334–2356, 2020.

ROSA-CLOT, M.; TINA, G. M.; NIZETIC, S. Floating photovoltaic plants and wastewater basins: An Australian project. *Energy Procedia*, v. 134, n. October, p. 664–674, 2017.

SACRAMENTO, E. M. et al. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. *IET Renewable Power Generation*, v. 9, n. 8, p. 1019–1024, 2015.

SANTOS, I. Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura. Tese (Doutorado em Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Orientador: Ricardo RÜTHER. Florianópolis, 2013.

SCHEIN, E. et al. Estudo de implantação de energia solar em unidades produtivas de uma empresa de calçados no nordeste brasileiro. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 12, p. 30327–30340, 2019.

SCHNOOR, J. L. Water-energy nexus. *Environmental Science and Technology*, v. 45, n. 12, p. 5065, 2011.

SIMIONI, T.; SCHAEFFER, R. Georeferenced operating-efficiency solar potential maps with local weather conditions – An application to Brazil. *Solar Energy*, v. 184, n. April, p. 345–355, 2019.

SILVA, L. F.; CARVALHO, T. C. Análise da viabilidade econômica da implantação de energia solar fotovoltaica em uma pequena empresa envasadora de água no Ceará. Trabalho de conclusão de curso. *Ciência e Tecnologia*. 2018.

STRANGUETO, K.M.S. Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Energia Elétrica através de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes em Reservatórios de Hidroelétricas. Doctoral Dissertation (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2016.

TERRAPON-PFAFF, J. et al. Energising the WEF nexus to enhance sustainable development at local level. *Journal of Environmental Management*, v. 223, n. December 2017, p. 409–416, 2018.

TINÔCO I.; BEZERRA B.; LUCIO P.; BARBOSA L. (2018). Characterization of Rainfall Patterns in the Semiarid Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ - Vol. 41 - 2 / 2018* pp. 397-409

UNITED NATIONS; NATIONS, U. The Great Green Technological Transformation. [s.l: s.n.].

VAN VUUREN, D. P. et al. Integrated scenarios to support analysis of the food–energy–water nexus. *Nature Sustainability*, v. 2, n. 12, p. 1132–1141, 2019.

ANEXOS

APÊNCIDE A - REDUÇÃO DA EVAPORAÇÃO COM PLACAS FLUTUANTES

Redução da evaporação com placas flutuantes		
Trabalho	Localização	Parâmetro
2018 - Farfan e Breyer	Global	Com 25% de cobertura, aumenta 6,3% disponibilidade de água
2017 - Rosa-Clot, Tina e Nizetec	Austrália	$R_{evap} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left\{ \frac{\Delta_w (Q^* - N) + 86400 q_a C_a (e_w^* - e_a) / r_a}{\Delta_w + \gamma} \right\}$
2010 - Assouline	Global	$\varepsilon = 1 - (1 - \chi)^{2/3}$
Utilizada no estudo		$\varepsilon = 1 - (1 - \chi)^{2/3}$

APÊNCIDE B - PRODUÇÃO MÉDIA DE ENERGIA POR M² DE PLACA FOTOVOLTAICA

Comparativo: Produção média de energia por m ² de placa fotovoltaica		
Trabalho	Produção média mensal (kWh/m ²)	Localização
2018 - Silva - Implantação de sistema solar fotovoltaico em pequena empresa	17,1	Aracati - CE
2020 - NeoSolar - Calculadora Solar	16,85	Madalena - CE
2016 - Ferreira - Microgeração fotovoltaica no Ceará	22	Fortaleza - CE
2018 - Moura - Potencial de geração em Aterro Sanitário	27	Aterro Caucaia - CE
2018 - Fernandes - Rede fotovoltaica em edificação pública	22,5	Jaguaruana - CE
2019 - Schein - Implantação energia solar em empresa de calçados	23,7	Ceará

APÊNCIDE C - ANÁLISE POTENCIAL DE PLACAS FLUTUANTES EM AÇUDES NO CEARÁ

2018 – Cavalcante - Análise Potencial de Placas flutuantes em açudes no Ceará				
Açude	Área limite (m ²)	Qtd. de Sistemas de 50.000 m ²	Eletricidade gerada em uma planta de 50000 m ² (MWh)	Produção média mensal (kWh/m ²)
Castanhão	960.000	19	14242	23,74
Banabuiú	280.000	5	13279	22,13
Pentecoste	246.000	4	14153	23,59
Caxitoré	260.000	5	10055	16,76
Orós	650.000	13	14355	23,93
Araras	600.000	12	14973	24,96
Pacajús	480.000	9	13920	23,20
Gavião	172.000	3	15275	25,46
Gangorra	226.278	4	9686	16,14
Pacoti	360.000	7	13839	23,07
Média do estudo				20,4

APÊNCIDE D - AUMENTO % DE PRODUÇÃO DE ENERGIA EM SISTEMAS FLUTUANTES

Aumento % de produção de energia em sistemas flutuantes		
Trabalho	Percentual de aumento	Localização
2018 - CAZZANIGA	4%	Itália
2015 - Sacramento	9,5-14,5%	Brasil
2014 - CHOI	11%	Coreia do Sul
Utilizada no Estudo	10%	Ceará