



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CENTRO DE CIÊNCIAS DE BALSAS – CCBA

**Contribuições para Estudos sobre a Disponibilidade Energética partir de
Fontes Solar Fotovoltaica e Biomassa no Sul do Maranhão**

Discente: Millena Marinho Rocha¹

e-mail: millena.rocha@discente.ufma.br

Orientador: Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto²

e-mail:pedro.neto@ufma.br

BALSAS
2022

¹ Coordenação do Curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia/CPBL – Balsas

² Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica/CPBL – Balsas

MILLENA MARINHO ROCHA

Contribuições para Estudos sobre a Disponibilidade Energética a partir de Fontes Solar Fotovoltaica e Biomassa no Sul do Maranhão

Trabalho de Contextualização e Integração Curricular II apresentado ao Curso Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto

BALSAS

2022

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Marinho Rocha, Millena.

Contribuições para Estudos sobre a Disponibilidade Energética a partir de Fontes Solar Fotovoltaica e Biomassa no Sul do Maranhão / Millena Marinho Rocha. - 2022.

43 f.

Orientador(a): Pedro Bezerra Leite Neto.

Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, Balsas, 2022.

1. Biomassa. 2. Complementaridade energética. 3. Disponibilidade. 4. Energia solar fotovoltaica. 5. Sistema híbridos de energia. I. Bezerra Leite Neto, Pedro. II. Título.

MILLENA MARINHO ROCHA

Contribuições para Estudos sobre a Disponibilidade Energética a partir de Fontes Solar Fotovoltaica e Biomassa no Sul do Maranhão

Trabalho de Contextualização e Integração Curricular II apresentado ao Curso Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto

Aprovado em 29 de julho de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto, Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Raimundo Nonato Diniz Costa Filho, Universidade Federal do Maranhão

Prof. Me. João Eduardo Ribeiro Baptista, Universidade Federal do Maranhão

Prof. Me. Wenllson Carlos Ferreira Leite, Universidade Federal do Maranhão

Aos meus pais, José Nilson de Sousa Rocha e Aurileth de Sousa Marinho Rocha, que sempre me deram todo apoio necessário durante todos esses anos, apesar da distância física que nos separavam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me ajudar a superar os obstáculos e por sempre me dar forças durante os períodos mais desafiadores do curso.

Agradeço a minha família, pois eles serão sempre meu alicerce. Primeiramente aos meus pais José Nilson e Aurileth, dois professores excepcionais que me ensinaram que a educação abre as portas para um mundo de possibilidades e que não mediram esforços para me dar a melhor educação possível, mesmo que isso significasse abdicar do nosso tempo juntos, nunca me esquecerei do exemplo de abnegação de vocês, e sempre serei grata a isso. Obrigada por todo suporte! E em especial, agradeço também aos meus irmãos, Hellen e Hudson por sempre se fazer presentes nessa etapa, por me animarem em dias que tudo parecia um fardo, e por comemorarem junto comigo as metas que alcançava ao longo da graduação. Vocês são incríveis!

Agradeço também aos meus amigos que sempre me acompanharam durante minha jornada acadêmica, apesar de termos traçado caminhos diferentes durante o curso, o laço de amizade que criamos foi forte o suficiente para não nos distanciarmos. Agradeço muito por todo companheirismo e palavras de encorajamento que me deram no tempo certo.

Agradeço meu orientador, professor Pedro Bezerra pelo profissionalismo, empenho, dedicação e paciência que demonstrou durante a realização deste trabalho, sem dúvidas tive a oportunidade de aprender bastante com suas observações precisas sobre a temática.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade e as perspectivas de sistemas híbridos de energia renováveis, analisando o perfil de sazonalidade entre as fontes e definindo a complementaridade que contribuem diretamente com a diversificação da matriz energética brasileira, com enfoque na região sul Maranhense. Neste trabalho foram realizadas avaliações de métodos apropriados para definir as características e o perfil sazonal de geração energia solar fotovoltaica e biomassa. A metodologia deste trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica da literatura acerca da integração e complementaridade entre fontes renováveis, envolvendo também análises de sensibilidade e simulações computacionais utilizando o software Homer Pro. Além disso, interações com empresas locais foram realizadas objetivando avaliar o potencial energético das atividades econômicas relacionadas à geração a partir de fontes renováveis. As análises financeiras e energéticas permitiram dar subsídios a uma avaliação descritiva sobre aproveitamentos de recursos energéticos diversificados na região sul maranhense.

Palavras-chaves: Sistema híbridos de energia; Complementaridade energética; Disponibilidade; Energia solar fotovoltaica; Biomassa.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the feasibility and prospects of hybrid renewable energy systems, analyzing the seasonality profile between energy sources and defining the complementarity that directly contributes to the diversification of the Brazilian energy matrix, focusing on the southern region of Maranhão. This work evaluated appropriate methods to define photovoltaic and biomass solar energy generation characteristics and seasonal profiles. The methodology of this work consists of a literature search on the integration and complementarity between renewable sources, also involving sensitivity analyses and computer simulations using Homer Pro software. In addition, interactions with local companies were conducted to assess the energy potential of renewable energy sources related to generating energy. Finally, the financial and energy analyses made it possible to provide subsidies for a descriptive assessment of the use of diversified energy resources in the southern region of Maranhão.

Keywords: Hybrid energy system; Energy complementarity; Availability; Photovoltaic solar energy; biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de sazonalidade entre as fontes de energia eólica, solar e hidráulica	15
Figura 2. Distribuição das usinas geradoras de energia em operação no Maranhão.....	16
Figura 3. Distribuição das termelétricas no Maranhão que fazem o uso da biomassa.....	17
Figura 4. Irradiação solar no estado do Maranhão.....	19
Figura 5. Município do estado do Maranhão com UFV em operação no ano de 2022	20
Figura 6. Destinação final das árvores cultivadas em florestas energéticas.....	25
Figura 7. Dados de irradiação solar gerados pelo software HOMER PRO	31
Figura 8. HSP geradas no software HOMER PRO para a região de Balsas-MA	31
Figura 9. Temperatura mensal da cidade de Balsas-MA	32
Figura 10. Produção de dejetos suínos para a granja Agromina.....	32
Figura 11. Eficiência do gerador a biogás de 500 kW na potência nominal de operação...	33
Figura 12. Valor líquido total do sistema solar fotovoltaico e biomassa	35
Figura 13. Custo por kWh para o sistema solar fotovoltaico e biomassa conectado à rede	36
Figura 14. Custo total de capital para o sistema solar fotovoltaico	37
Figura 15. Geração de energia solar fotovoltaica conectada à rede.....	37
Figura 16. Geração da fonte biomassa conectada à rede	38
Figura 17. Geração do sistema híbrido (solar fotovoltaica e biomassa)	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Domínios da complementaridade	24
Tabela 2. Capacidade de geração da fonte solar fotovoltaica e biomassa.....	33
Tabela 3. Capacidade de geração da fonte solar fotovoltaica e biomassa para o cenário 3	33
Tabela 4. O valor líquido total para a instalação do sistema fotovoltaico.....	34
Tabela 5. Custo relacionados ao gerador a biogás conectado à rede.....	34
Tabela 6. Custo total de capital para o sistema solar fotovoltaico	36
Tabela 7. Custo relacionados ao gerador biogás conectado à rede	36
Tabela 8. Composição da geração da fonte solar fotovoltaica conectada à rede	37
Tabela 9. Composição da geração a biogás conectado à rede	38
Tabela 10. Composição da geração do sistema híbrido (solar fotovoltaica e biomassa)	39

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E NOMENCLATURA

AGEITEC – Agência Embrapa de Informação Tecnológica
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN – Balanço Energético Nacional
CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CO₂ – Dióxido de Carbono
CRESESB – Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio Brito
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEE – Gases do Efeito Estufa
GHI – *Global Horizontal Irradiance* (Irradiação solar horizontal)
HSP – Horas de Sol Pleno
IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA – *International Energy Agency*
IMESC – IMESC Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos
kW – kilowatts
kWh/m² – quilowatt-hora por metro quadrado
LABDER – Laboratório de Recursos Energéticos Distribuídos
MJ/kg – Megajoule por quilograma
MW – Megawatt
OIE – Oferta Interna de Energia
ONS – Operador Nacional do Sistema
SIGA – Sistema de Informações de geração da ANEEL
SIN – Sistema Interligado Nacional
UFV – Usina Solar Fotovoltaica
UTE – Usina Termelétrica

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E NOMENCLATURA.....	11
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Justificativa	21
1.2. Objetivos	22
2. REFERENCIAL TEÓRICO	23
3. METODOLOGIA	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1. Localização e caracterização do sistema.....	30
4.2. Perfil de carga	30
4.3. Potencial dos recursos renováveis.....	31
4.3.1. Irradiação solar e temperatura	31
4.3.2. Recurso de biomassa	32
4.4. Especificação e modelo de dimensionamento dos componentes	33
4.4.1. Capacidade de geração das fontes.....	33
4.4.2. Eficiência do gerador a biogás	33
4.5. Análise econômica	34
4.5.1. Valor presente líquido total	34
4.5.2. Custo de energia	35
4.5.3. Custo total de capital	36
4.6. Geração das fontes	37

4.6.1.	Geração da fonte solar fotovoltaica.....	37
4.6.2.	Geração da fonte biomassa.....	38
4.6.3.	Geração do sistema híbrido (solar fotovoltaica e biomassa)	38
5.	CONCLUSÃO.....	40
6.	REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

O uso de fontes renováveis de energia tem se tornado cada vez mais consolidado nos sistemas elétricos atuais. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, em inglês), os combustíveis fósseis representaram 81% da matriz energética global no ano de 2019 (IEA, 2021). É inegável que o uso generalizado dos combustíveis fósseis tem acarretado problemas ambientais como emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE), gerando a preocupação mundial em busca de uma matriz energética mais segura e sustentável. Além disso, do ponto de vista econômico, fontes renováveis tais como solar fotovoltaica, biomassa ou eólica tem se tornado cada vez mais competitivas no mercado, em relação a fontes não renováveis mais tradicionais, como usinas termelétricas a gás, por exemplo.

A pandemia de COVID-19 causou uma diminuição considerável na demanda e na produção de energia elétrica. O Boletim Trimestral de Consumo de Eletricidade da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020), apontou um declínio de 8,3% no consumo de eletricidade no Brasil. Este cenário causou impactos direto ao setor elétrico, gerando prejuízos financeiros, e posteriormente influenciando o aumento do custo do consumo por kWh – problema que poderia ser evitado se a matriz energética fosse melhor diversificada através da exploração de fontes energéticas alternativas.

Embora os benefícios do uso em larga escala das fontes renováveis de geração tenham se tornado cada vez mais evidentes, algumas características intrínsecas a este tipo de geração ainda podem representar desafios ao planejamento e à operação dos sistemas elétricos em que estas fontes estão inseridas.

Um destes desafios consiste no perfil variável da fonte de geração. Fontes primárias de geração típicas como o vento ou irradiação solar são altamente estocásticas, pois possuem características como intermitência e aleatoriedade, essas características não são compatíveis com o atendimento seguro às cargas do sistema elétrico, pois um dos requisitos para isto é que as fontes de geração sejam capazes de fornecer energia de forma contínua e previsível.

No Brasil, as fontes primárias mais comuns são: vento, irradiação solar e vazão hidráulica que se destacam por ter características sazonais, ou seja, são recursos energéticos que a depender da época do ano, podem estar disponíveis em abundância, ou em grande escassez. A Figura 1 retrata o comportamento sazonal da geração hidráulica, solar fotovoltaica e eólica do subsistema Nordeste,

que é parte do Sistema Interligado Nacional (SIN). Observa-se que cada uma das fontes apresenta um perfil sazonal próprio. Esta constatação permite inferir que um sistema elétrico composto por um mix de fontes, cada uma com um perfil próprio de sazonalidade, pode ser mais apropriado do que o um sistema composto por um único tipo de fonte. Isso é explicado pelo fato de que a diversificação das fontes de geração pode proporcionar uma eventual complementaridade entre elas, ou seja, nos períodos em que uma fonte está escassa, outra fonte eventualmente estará em abundância.

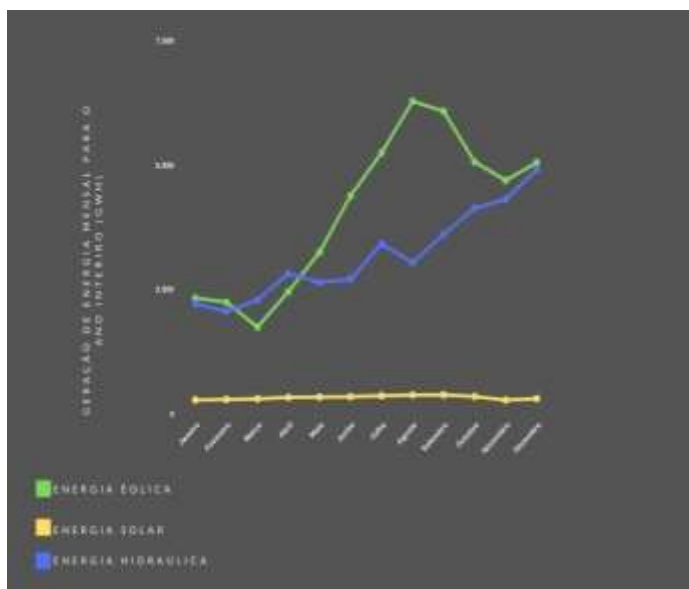


Figura 1. Perfil de sazonalidade entre as fontes de energia eólica, solar e hidráulica.

(Fonte: ONS, 2021)

A fim de diversificar a matriz energética, a inserção de fontes renováveis como a biomassa vem ganhando cada vez mais destaque. Segundo os dados do BEN (Balanço Energético Nacional) de 2021, a biomassa da cana chegou a representar 19,1% do conjunto das renováveis da repartição da oferta interna de energia (OIE). A variabilidade das fontes energéticas deve ser baseada majoritariamente no aproveitamento consciente das fontes locais disponíveis e na produção de matéria prima, pois é de suma importância para garantir o desenvolvimento regional.

Assim como as fontes renováveis citadas anteriormente, a biomassa também apresenta um perfil de sazonalidade, pois a matéria prima em si é considerada uma fonte primária e ao decorrer do ano há épocas certas para o plantio e para a colheita. Além disso, a época da colheita tem relação direta com as condições climáticas de cada região. Segundo a Agência Embrapa de Informação

Tecnológica (AGEITEC), na região Nordeste este período ocorre entre os meses de novembro a abril.

Em termos de geração de energia elétrica, a matriz energética maranhense possuía 50 usinas em operação até o primeiro semestre de 2022. Os combustíveis responsáveis por auxiliar no processo de geração das usinas situadas no estado do Maranhão são provenientes das fontes hídrica, eólica, fóssil, biomassa e solar (SIGA, 2022). Dessa forma, a região tem contribuído com a participação significativa de 4,1 GW em energia elétrica produzida através das usinas em geral instaladas no estado, entre elas estão as usinas hidrelétricas (UHE), usinas eólicas (EOL), usina solar fotovoltaica (UFV) e usinas termelétricas (UTE). A distribuição dos empreendimentos em operação no estado do Maranhão está representada na Figura 2.

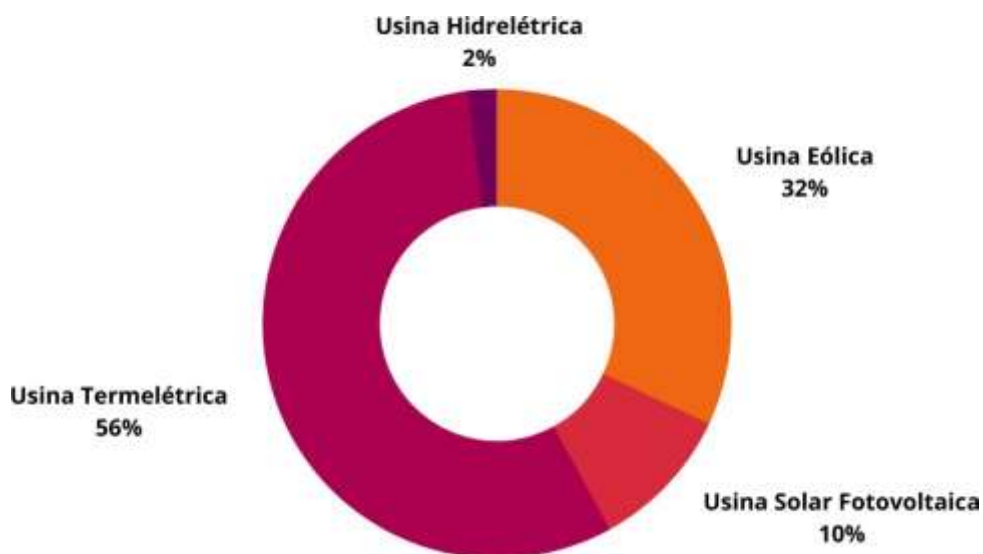


Figura 2. Distribuição das usinas geradoras de energia em operação no Maranhão
(Fonte: SIGA, 2022)

Atualmente, o estado do Maranhão possui 29 usinas termelétricas (UTE) em operação, entre estas apenas 6 utilizam fonte de energia renováveis, onde empregam o uso da biomassa para a geração de energia elétrica (CCEE, 2022). De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a usina de Suzano Maranhão – localizada no município de Imperatriz – ocupa a 5ª posição das maiores geradoras termelétricas do estado, apresentando a capacidade instalada de 255 MW no ano de 2022. O produto da biomassa utilizado na geração de energia elétrica na termelétrica citada são os resíduos florestais: licor negro (lixívia), que são produzidos através da cozedura da madeira.

A distribuição dos demais municípios maranhenses que fazem o uso da biomassa nas usinas termelétricas estão descritos na Figura 3.

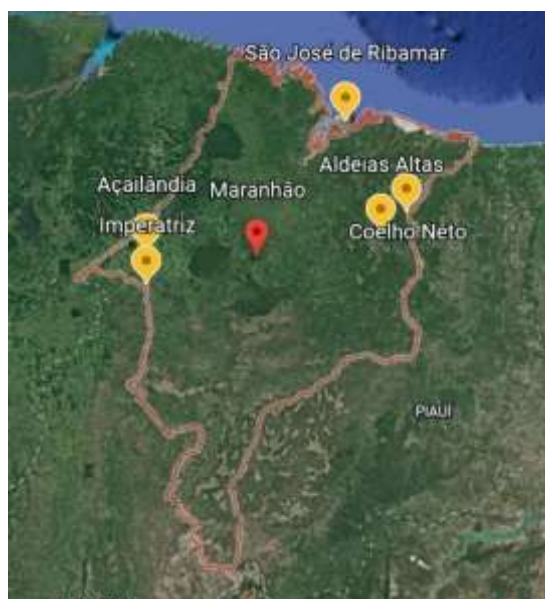


Figura 3. Distribuição das termelétricas no Maranhão que fazem o uso da biomassa.

Fonte: Google Earth, 2022.

Conforme abordado, o estado do Maranhão apresenta usinas termelétricas que convertem biomassa em energia elétrica. Geograficamente, as termelétricas estão localizadas nas mesorregiões Sudoeste, Norte, e Nordeste do estado. O local das instalações das termelétricas é escolhido estrategicamente – próximo ao polo industrial de São Luís, capital do Maranhão.

Por outro lado, de acordo com o Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA) na região sul maranhense não há registros de usinas termelétricas que empregam o uso da biomassa. Contudo, há usinas termelétricas não conectadas à rede na região. A exemplo de citação, a fazenda Agro Serra – localizada no município de Balsas – utiliza resíduos da agricultura local, onde a fonte primária é a cana-de-açúcar e o principal produto gerado a partir dessa fonte é o biocombustível etanol. A energia elétrica é gerada através do bagaço de cana, entretanto, devido à ausência de linha de transmissão próxima a localidade, o bagaço não é totalmente aproveitado, pois não é possível vender o excedente de energia gerada para a concessionária.

Apesar dos resíduos agroindustriais serem abundantes na região, existem ainda a disponibilidade de outros recursos para produção energética, entre eles estão os resíduos animais. A exemplo disso, a granja Agromina – localizada no sul do estado – é a terceira maior produtora de suínos do Maranhão (IMESC, 2020). Os resíduos suínos apresentam um potencial elevado no

que se refere à produção de energia, pois através deles é possível produzir biogás ou biometano – por meio do processo biológico (fermentação e digestão anaeróbia) – e, posteriormente, a biomassa poderá ser utilizada como subproduto, visto que o biofertilizante produzido através deste resíduo animal poderá ser aplicado em plantações da região, reduzindo o uso de fertilizantes químicos. No entanto, devido ausência de mão de obra qualificada para a manutenção, o biodigestor da granja de suínos foi desativado no ano de 2019.

Paralelamente, no contexto de disponibilidade de recursos, a casca do coco verde, em específico, a fibra do coco, apresenta um potencial energético elevado. Dito isto, próximo ao município de Balsas está localizada a fazenda de coco verde. A propriedade possui a maior área de plantação de coco verde da região sul maranhense, conseqüentemente apresenta uma elevada produção agrícola. Porém, apesar da casca do coco possuir um elevado potencial energético, este recurso é utilizado apenas para fins de adubação. Após a extração da água do coco, a casca é triturada e transformada em fibras que são destinadas a adubação. O que antes era um incômodo devido ao grande acúmulo de cascas do coco, se tornou um negócio lucrativo que tem como destinação a adubação do plantio da fazenda. Como também, a casca do coco verde é vendida aos produtores de coco verde no município de Juazeiro-BA. Dessa forma, o uso da casca do coco possui potencialidade de se tornar bastante significativo para as fazendas produtoras, gerando energia por meio de usinas termelétricas.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o estado do Maranhão abrange uma área de 329.651,496 km² (IBGE, 2021). Para avaliar o potencial de uma localidade, um dos parâmetros analisados é a irradiância, tal parâmetro depende fortemente da latitude e da longitude local. Apesar do estado do Maranhão possuir a segunda maior área em território da região Nordeste, ao realizar um comparativo entre os 9 estados do Nordeste, em termos de irradiação solar disponível no Brasil, o estado maranhense alcançou o menor índice de irradiância solar gerando aproximadamente 1935 kWh/m². Contudo, apesar de possuir a menor irradiância média da região Nordeste, o estado está acima da média nacional anual, esta por sua vez é de 409 Wh/m². (Atlas Solar Global, 2022).

Comumente, os termos radiação e irradiação solar são confundidos na literatura. O termo radiação solar refere-se a energia emitida pelo Sol, que é propagada no espaço através das linhas eletromagnéticas, que possuem direções e comprimentos distintos entre si. Por outro lado, a irradiação solar pode ser definida como a métrica que quantifica a energia por unidade de área de

radiação solar instantânea que incide sobre a superfície terrestre, e por sua vez, é dada por unidade de energia, watts por metro quadrados (Wh/m^2). Ou seja, a radiação é a transmissão de energia através do espaço e a irradiação solar é a exposição de uma superfície à radiação. Dessa forma, a irradiância pode ser definida como a taxa em que a radiação é transmitida. A Figura 4 representa a irradiação solar horizontal (GHI, em inglês) para o estado do Maranhão.

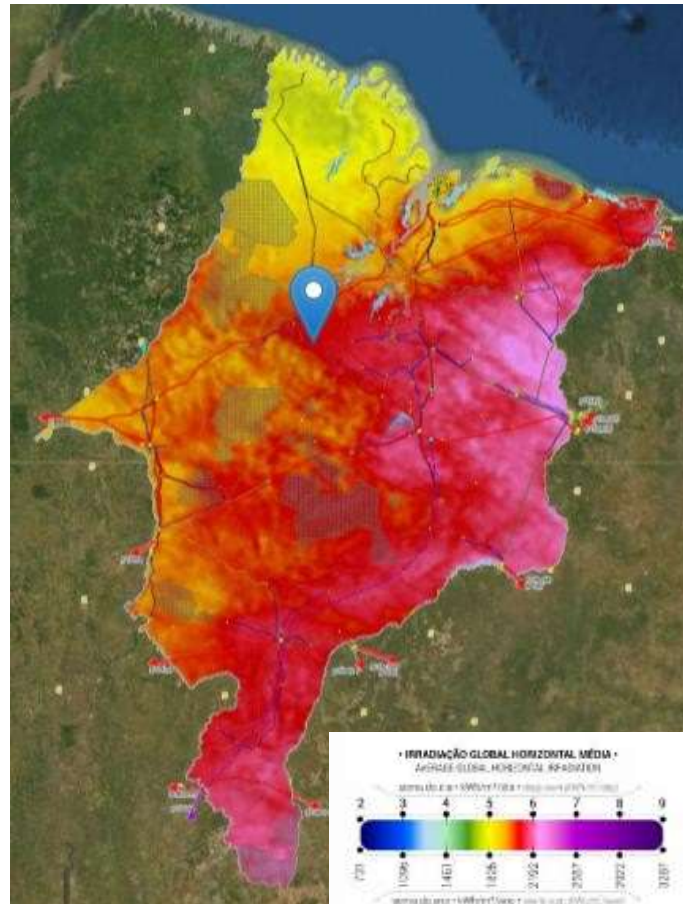


Figura 4. Irradiação solar no estado do Maranhão

Fonte: Eosolar, 2022.

De acordo com o SIGA (Sistema de Informações de Geração da ANEEL) as usinas solares fotovoltaicas (UFV) são distribuídas em quatro unidades no Maranhão, os dados disponibilizados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) são atualizados mensalmente. Em termos de potência outorgada, ou seja, a potência que a usina é autorizada a gerar, a UFV de Topázio I é responsável por gerar 420 kW, e a segunda maior geração é representada pela usina DVM Solar I

gerando 210,60 kW. Ambas usinas se situam no município de Imperatriz, Maranhão. A Figura 5 representa um panorama geral das UFV em operação no estado.



Figura 5. Município do estado do Maranhão com UFV em operação no ano de 2022.

Fonte: Google Earth, 2022.

A região sul maranhense apresenta empreendimentos no setor agrícola que fazem o uso da energia solar fotovoltaica. Como por exemplo, à 17 km do município de Balsas está localizada a granja Frango Natto. A justificativa para a busca de uma solução energética eficaz é necessária uma vez que dentre os principais desafios encontrados pelos avicultores é a busca pelo controle de temperatura ideal no aviário, visto que o estresse térmico está associado diretamente à mortalidade em massa das aves. Conseqüentemente, por utilizar de ferramentas que consomem uma elevada potência elétrica (como exaustores e painéis de resfriamento), o custo de energia elétrica é consideravelmente alto. Sendo assim, a aplicação de energia solar fotovoltaica contribui diretamente na redução de custos relacionados a fatura de energia elétrica.

Além do empreendimento citado anteriormente, a granja de suínos também utiliza a energia solar fotovoltaica. Em termos de potencial solar, a região de Balsas apresenta uma média de irradiação anual de $5,32 \text{ kWh/m}^2$, onde a irradiação mínima atinge a média mensal de $4,96 \text{ kWh/m}^2$ no inverno e alcança o pico de $6,40 \text{ kWh/m}^2$ no verão. (CRESCESB, 2022). Sendo assim, a empresa de suínos optou por adotar o sistema solar fotovoltaico ao invés do biodigestor (biomassa), em decorrência à essa boa irradiação solar ser suficiente para suprir a demanda energética do local.

1.1. Justificativa

As tecnologias de energias renováveis têm como enfoque atender às demandas atuais vigentes, no que se diz a respeito de segurança energética e meio ambiente, para solucionar esse obstáculo fatores como meio ambiente, aspectos sociais e econômicos devem ser considerados, pois ter uma visão holística, que considera a totalidade do sistema é indispensável.

Dentre as fontes de geração alternativas, a energia solar se destaca devido a sua alta disponibilidade no Brasil, principalmente na região Nordeste. Entretanto, por ser uma fonte de natureza renovável a energia solar é altamente estocástica, em função de possuir propriedades como intermitência e aleatoriedade, essas propriedades indicam que o fornecimento do sistema de energia solar está associado diretamente à irradiância solar disponível no local, ou seja, fatores ambientais e climáticos são analisados, pelo fato do recurso da energia solar ser delimitado a um certo intervalo de tempo.

Por outro lado, a biomassa é reconhecida por ser uma fonte renovável tradicional, entretanto, esse sistema apresenta características sazonais que estão atreladas ao tipo de substrato utilizado como fonte de geração. Por exemplo, regiões que possuem atividades agrícolas significativas, a exemplo do sul do Maranhão, podem apresentar elevado potencial para geração a partir de biomassa. No entanto, tal potencial de geração está condicionado à disponibilidade de biomassa proveniente de resíduos agrícolas que está condicionada diretamente ao perfil anual da atividade agrícola local.

O fato de uma fonte energética ser reconhecida como renovável não implica afirmar que todas as fontes instaladas no sistema energético serão complementares, isso se justifica em razão de que cada fonte apresenta um perfil próprio de sazonalidade, e que os períodos de escassez e abundância podem coincidir, gerando prejuízos econômicos e ambientais. Por exemplo, não seria viável instalar usinas eólicas juntamente com a solar, em regiões não litorâneas, pois não seriam complementares devido ao comportamento do vento. Por isso é de extrema importância realizar uma análise das fontes de geração, a fim de traçar um perfil que melhor se encaixe nos padrões de confiabilidade energética.

1.2. Objetivos

Com base na justificativa descrita acima, este trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade e as perspectivas de sistemas híbridos, especificamente entre as fontes de geração renováveis, sendo estas, solar e biomassa, e a partir dessa relação inferir se essas fontes são complementares ou não, com enfoque na região Sul do Maranhão.

Desta forma, os objetivos específicos são:

- Analisar o comportamento sazonal entre as fontes, solar fotovoltaica e biomassa;
- Investigar a disponibilidade de recursos energéticos com potencial de geração;
- Realizar um comparativo de geração entre as fontes solar fotovoltaica e biomassa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O aproveitamento de recursos energéticos provenientes de fontes renováveis e o desenvolvimento de sistemas híbridos, são considerados soluções úteis para atender às crescentes demandas de energia da sociedade atual (DINCER, 2000). Em compasso com o desenvolvimento tecnológico, constatou-se melhorias consideráveis em relação à eficiência de utilização dos recursos renováveis no decorrer dos anos (CHANG et al, 2019). Nesse segmento, as energias renováveis se destacam por ser uma peça central na busca por um cenário de uma matriz energética sustentável, isso abrange tanto os sistemas conectados à rede quanto os sistemas autônomos. Para superar o problema de intermitência de tais sistemas, os sistemas híbridos renováveis são indispensáveis. (PÉREZ-NAVARRO, A. et al, 2016).

Para superar o descompasso entre a demanda e a oferta proporcionada pela geração renovável a hibridização de duas ou mais fontes de energia é necessária. Sendo assim, nesse contexto a operação de fontes híbridas de energia baseia-se na complementaridade das fontes renováveis. (NIXON, J. et al, 2012).

O termo complementaridade, de acordo com o dicionário Oxford Languages, significa: “Relação entre duas ou mais coisas diferentes que melhoram ou enfatizam as qualidades ou defeitos uma da outra”. No contexto energético, a complementaridade pode ser definida como a capacidade das fontes de gerações funcionarem de forma complementar, ou seja, quando uma fonte estiver em escassez, a outra estará em abundância.

A complementaridade se manifesta em três domínios: Tempo, espaço e no domínio temporal-espacial. Na complementaridade espacial, os recursos energéticos se complementam em determinada região, por outro lado, a complementaridade temporal depende dos períodos de disponibilidade dos padrões anuais das fontes de geração, considerando o domínio do tempo. Ademais, a complementaridade espaço-temporal é considerada para uma única ou múltiplas fontes energéticas cuja complementaridade é investigada simultaneamente nos domínios do tempo e do espaço. (JURASZ, Jakub et al., 2020).

Tabela 1. Domínios da complementaridade.

Complementaridade	Fontes consideradas	Regiões consideradas	Fatores que impulsionam a complementaridade
Temporal	≥ 2	$= 1$	Disponibilidade diferente do tempo
Espacial	≥ 1	≥ 2	Disponibilidade diferente do espaço
Espacial-temporal	≥ 1	≥ 2	Disponibilidade diferente do tempo-espaço

Fonte: (JURASZ, Jakub et al., 2020).

As fontes de energia renováveis não convencionais são de natureza intermitente, nesse quesito, a geração de energia solar fotovoltaica é afetada diretamente pelas nuvens, que causam uma queda abrupta de energia para menos de 50% de sua capacidade nominal. (NETO; SAAVEDRA; OLIVEIRA, 2020). Por outro lado, a geração energética da biomassa depende fortemente da disponibilidade de matéria prima, que é oferecida em abundância durante um determinado período anual. (EMBRAPA, 2017). A integração da biomassa no projeto gera a possibilidade de suavizar a intermitência entre as fontes de gerações inseridas no sistema. Para que a biomassa obtenha o máximo de aproveitamento possível na produção de bioenergia, a matéria prima deverá atender requisitos como alto teor de fibras e da lignina, baixo teor de cinzas, alto poder calorífico e densidade alta. (MARAFON et.al, 2016).

Considerando o setor agrícola da Colômbia, um estudo analisou a viabilidade técnica da inserção da biomassa dispendo da casca de coco como matéria prima. Os parâmetros utilizados nesta pesquisa foram baseados nas características termo físicas, absorvência e emissão de poluentes do resíduo da agricultura local em análise. Por fim, os resultados indicaram que a biomassa, ou seja, a casca do coco possui um baixo teor de matéria inorgânica (baixa emissão de poluentes) e apresenta um poder calorífico elevado de 25,29 MJ/kg, o que comprova que a casca de coco possui um alto potencial para geração de energia. (STAND, L. M; OCHOA, G. V; FORERO, J. D, 2021).

O Brasil é um país agrícola que produz e exporta matérias-primas como arroz, cana-de-açúcar, soja, dentre outros. O vasto território brasileiro possui um potencial elevado quando se trata de aproveitamento da biomassa. Entretanto, por questões relacionadas a logística e acrescentando propriedades energéticas não desejáveis do insumo como baixa densidade, baixo poder calorífico e elevado teor de umidade, os resíduos da agricultura local não são comumente utilizados para geração de energia. Para contornar esse problema, ou seja, com objetivo de fornecer mais energia por unidade de volume, um estudo sugeriu que os resíduos de biomassa fossem compactados em briquetes (bloco compacto cilíndrico de alta densidade composto por resíduos de biomassa), e constatou que os resíduos de madeira, assim como a casca de arroz e café, são os resíduos agrícolas mais promissores que podem ser utilizados em briquetes (FELFLI, F. F et al, 2011).

A Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) é uma associação responsável por representar institucionalmente produtores independentes, investidores institucionais e associações estaduais brasileiras. Dessa forma, a cadeia produtiva de árvores plantadas segue o caminho do campo à indústria, ou seja, o conceito de florestas energéticas é amplamente difundido, pois a associação visa cultivar árvores para utilizá-las posteriormente como matérias-primas renováveis (BELING, R. R, 2016). Contribuindo de maneira significativa para o fornecimento de biomassa florestal, lenha e carvão vegetal. De acordo com o relatório de 2019 da IBÁ, os dados estatísticos revelaram que cerca de 9 milhões de hectares de árvores foram plantadas, dentre elas estão o eucalipto, pinus e espécies como araucária, paricá e teca. Essas árvores foram distribuídas para os segmentos apresentado no gráfico da Figura 6.

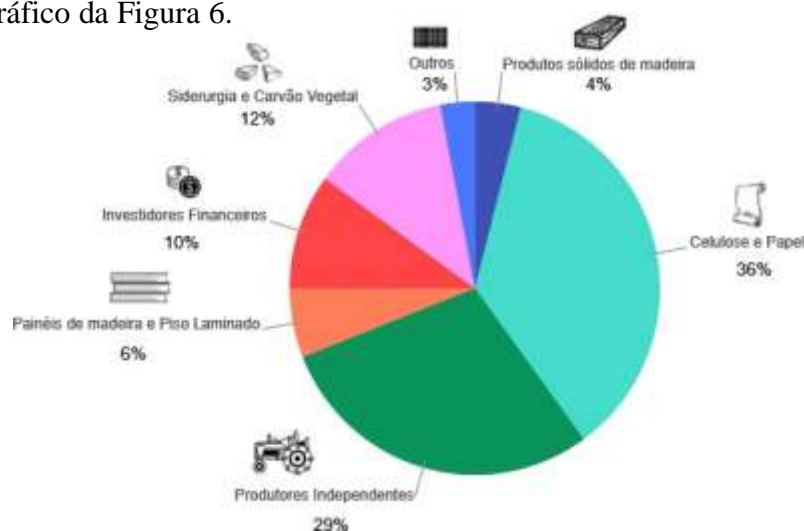


Figura 6. Destinação final das árvores cultivadas em florestas energéticas.

Fonte: IBÁ, 2019.

Em outra perspectiva, a energia solar é mais explorada na região por ter características como baixo custo de manutenção e alta disponibilidade no território nacional brasileiro (NASCIMENTO; ALVES, 2016). Em um contexto geral, a geração de energia solar fotovoltaica se sucede em várias etapas. Primeiramente quando a radiação solar incide sob o módulo fotovoltaico, é aplicada uma diferença de potencial entre as células integradas no módulo, esse fenômeno, conhecido como efeito fotovoltaico realiza a conversão de energia solar em energia elétrica. Ademais, a fonte energia solar fotovoltaica é reconhecida como uma fonte energética flexível, pois pode ser aplicada tanto aos sistemas conectados à rede quanto nos sistemas isolados. (YU J. et al, 2022).

A energia solar fotovoltaica possui características desejáveis como energia limpa, baixos custos operacionais, facilidade de instalação e integração além de ser uma fonte abundante. Entretanto, o uso exclusivo dessa fonte é uma faca de dois gumes, pois desafios na confiabilidade do sistema como intermitência surgem, e são causados por fatores como: latitude, horosazonalidade, variabilidade da atividade solar, e condições meteorológicas do local onde a energia solar fotovoltaica é implementada (GAO, D. et al, 2022).

Devido à natureza intermitente da energia solar, para obter um sistema confiável é necessário a integração com outra fonte estável. De maneira geral, a energia solar fotovoltaica é aplicada em sistemas híbridos de biomassa para acionar a turbina ou vários tipos de reações termoquímicas. (LI, X; WANG, C. 2020).

Ao associar dois ou mais sistemas renováveis, o problema da intermitência entre as fontes pode ser contornado, pois a eficiência energética total do sistema aumenta consideravelmente, permitindo com que o sistema obtenha a energia firme em comparação aos valores correspondentes de cada um dos sistemas analisados de forma individual (PÉREZ-NAVARRO, A. et al, 2016). Para fins de estudo, o Laboratório de Recursos Energéticos Distribuídos (LABDER) foi desenvolvido na Espanha, com o objetivo de descrever os resultados da análise de confiabilidade de um sistema híbrido, nesse laboratório é analisado o comportamento da biomassa e da energia solar, esta última também tem como ramificação o sistema de armazenamento de baterias (OFF-Grid) (PÉREZ-NAVARRO, A. et al, 2016). Ao integrar a energia solar em conjunto com o sistema energético da biomassa, menos energia é necessária para ser fornecida da usina e, conseqüentemente, menor será a emissão de gás poluente da combustão. (HASHIM, 2014).

Diante do que foi exposto, são imprescindíveis estudos acerca da complementaridade de sistemas energéticos a fim de diversificar a matriz energética de energias renováveis brasileira,

sendo assim é necessário que os recursos sejam avaliados e estudados em uma escala mais ampla, pois o Brasil é rico tanto em relação à matéria prima da biomassa, quanto ao nível de irradiação solar, principalmente nas regiões Norte e Nordeste. (PEREIRA, L. B. et al., 2019).

3. METODOLOGIA

O desempenho técnico foi avaliado através das análises computacionais dos sistemas de geração solar fotovoltaico e biomassa. Além disso, a avaliação financeira foi realizada através da avaliação do custo de geração a partir de ambas as fontes, considerando também períodos de retorno.

A investigação entre os perfis de geração solar fotovoltaica e biomassa é de extrema importância para preencher a lacuna de conhecimento envolvida na implementação e no desempenho da operação de sistemas híbridos. Nesse quesito, foram realizadas avaliações de métodos apropriados para caracterizar o perfil sazonal de geração da região sul maranhense a partir de fontes comuns em contexto regional, como a energia solar fotovoltaica e biomassa.

A principal contribuição deste estudo é avaliar o potencial energético da hibridização das fontes renováveis solar fotovoltaica e biomassa, com enfoque na região sul maranhense. Desse modo, o presente estudo abrange uma série de análises paramétricas, fundamentadas em pesquisas bibliográficas, simulações computacionais e levantamento de informações sobre as características de geração a partir de biomassa e fonte solar fotovoltaica no sul do Maranhão.

Dessa forma, a metodologia deste trabalho consiste inicialmente em realizar um levantamento de informações relacionadas à geração solar e a partir de biomassa em um contexto local, de modo que o perfil destas fontes seja devidamente caracterizado. Como parte desta pesquisa, foram realizadas interações com empreendimentos locais cujas atividades econômicas possam estar associadas à geração a partir de biomassa.

A partir das informações levantadas em etapa anterior, uma pesquisa quantitativa foi realizada a partir de análises e simulações computacionais que foram realizadas com o objetivo de avaliar de que forma estes recursos energéticos podem ser combinados entre si, com vistas a benefícios técnicos e financeiros.

Os resultados obtidos a partir de análises e simulações computacionais permitiram dar subsídios a uma avaliação descritiva sobre aproveitamentos de recursos energéticos na região sul maranhense.

Portanto, com base na metodologia apresentada espera-se alcançar os principais resultados da avaliação sobre o desempenho do sistema híbrido das fontes renováveis solar fotovoltaica e biomassa, considerando as características regionais do sul do Maranhão, permitindo contribuir com

as linhas de pesquisas nesse campo, assim como avaliar e recomendar as melhores aplicações dessas plantas híbridas, beneficiando os interessados que desejam investir na implementação do sistema energético híbrido solar fotovoltaico e biomassa na região Sul Maranhense.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Localização e caracterização do sistema

Um sistema híbrido ou complementar é a combinação entre duas ou mais fontes de energia renováveis. Nesse estudo, as fontes solar fotovoltaica e biomassa foram selecionadas para análise econômica e energética na região sul maranhense, objetivando avaliar de que forma estas fontes podem interagir entre si. Uma vez que as fontes de energias renováveis apresentam problemas relacionados a confiabilidade, considerando que a natureza intermitente das fontes renováveis está associada fortemente a dependência de variações climáticas. Diante disso, uma solução é utilizar essas duas fontes em conjunto, fornecendo uma segurança energética maior ao sistema. O local escolhido para este estudo situa-se na região de Balsas - MA. Dessa forma, para obter a otimização e produtividade deste sistema híbrido, o software HOMER PRO é uma ferramenta que auxilia na visualização dos dados, executando as tarefas de otimização e simulação de cenários. Os dados foram baseados em um estudo prévio conduzindo em “Estudo do conceito Net Zero Energy para implantação de fontes de energia renováveis e aplicação em uma granja de suínos em Balsas - MA” (BARBOSA, 2021). Neste caso, o presente trabalho se propõe a realizar um conjunto de análises adicionais envolvendo as fontes energéticas a biomassa e fotovoltaica. Para analisar a viabilidade econômica e energética ótima foram considerados três cenários:

- I. Energia solar fotovoltaica conectada à rede;
- II. Gerador a biogás conectado à rede;
- III. Sistema solar fotovoltaico e gerador a biogás conectado à rede.

4.2. Perfil de carga

Para dimensionar o sistema é necessário primeiramente avaliar o consumo de energia e a demanda da estrutura industrial escolhida. Portanto, para a granja de suínos a demanda de energia mensal na unidade consumidora é de 43.123 *kWh*. Dessa forma, durante um mês o perfil de carga médio para atender a demanda do sistema terá de ser de 1.437 *kW*.

4.3. Potencial dos recursos renováveis

4.3.1. Irradiação solar e temperatura

A região de Balsas está sob as seguintes coordenadas: latitude: 7° 31' 59" Sul, longitude: 46° 2' 6" Oeste, inserindo essas informações no HOMER PRO, é possível obter os dados de irradiação solar do local, onde a média anual alcança a faixa de 5,32 kWh/m², onde a irradiação mínima ocorre no inverno, produzindo a média mensal de 4,96 kWh/m² e alcança o pico de 6,40 kWh/m² no verão. A Figura 7 descreve os dados em um perfil anual.

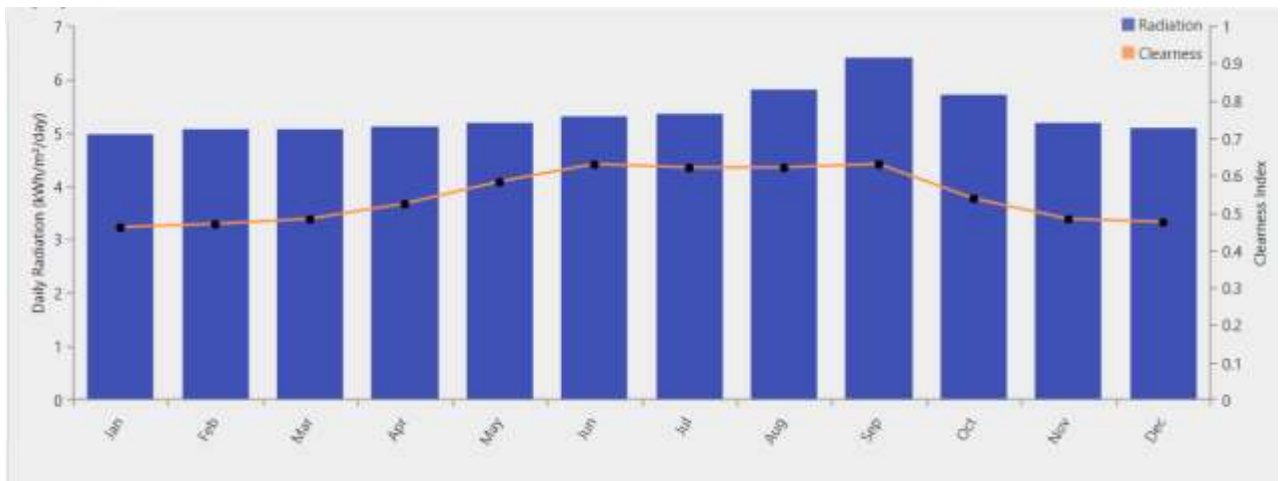


Figura 7. Dados de irradiação solar gerados pelo software HOMER Pro

As horas de sol pleno (HSP) é uma métrica importante a se considerar no sistema, pois determina a quantidade de horas que a fonte está disponível para a geração. Para a energia solar fotovoltaica em um perfil anual, os resultados são apresentados de hora a hora. A Figura 8 ilustra a quantidade de HSP gerada, para a Balsas - MA.

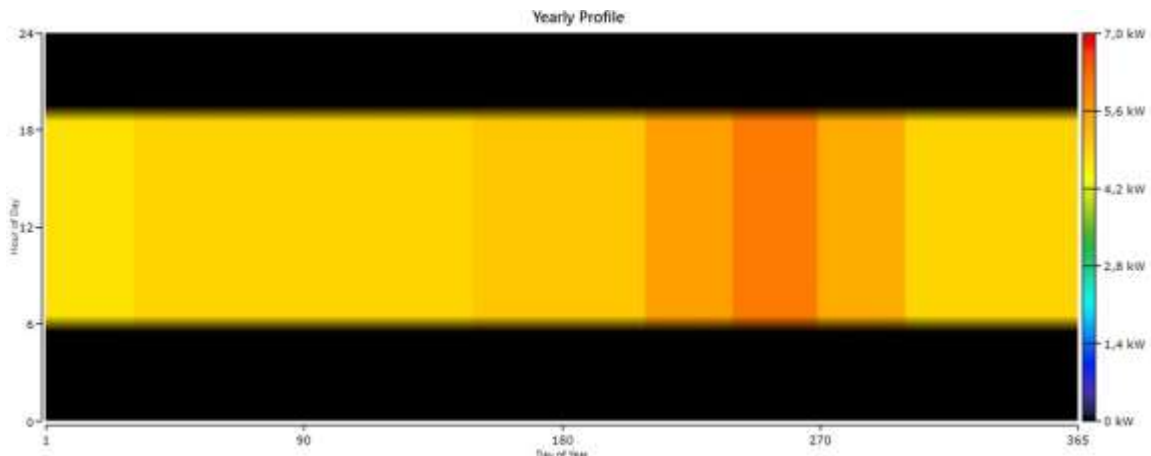


Figura 8. HSP geradas no software HOMER PRO para a região de Balsas-MA

O efeito da temperatura influencia diretamente na geração de energia fotovoltaica. Dessa forma, a temperatura média anual na região é de 26,24°, atingindo a temperatura máxima no mês de setembro (29,13°), e a mínima no mês de fevereiro (24,97°).



Figura 9. Temperatura mensal da cidade de Balsas-MA

4.3.2. Recurso de biomassa

O recurso da fonte biomassa incluem os resíduos animais. No relatório os dados são expressos em metros cúbicos, produzindo a média de 105,12 m³ de biogás mensal. Contudo, no software HOMER Pro os dados são representados por toneladas. Após verificar na literatura os valores típicos de geração em m³ por kg/dejeto, foi obtido aproximadamente o valor de 0,051 m³ por kg/dejeto (FERNANDES, 2012). Portanto, a produção de dejetos na granja de suínos atinge cerca de 103 toneladas ao dia. Vale destacar que a produção de dejetos não é constante durante o ano todo, pois depende da composição da matriz de suínos e da época do ano (no inverno a geração de resíduos é menor que no verão). Mas para fins de análise energética essa suposição de adotar uma média de produção mensal durante o ano é válida. A Figura 10 demonstra a produção anual.

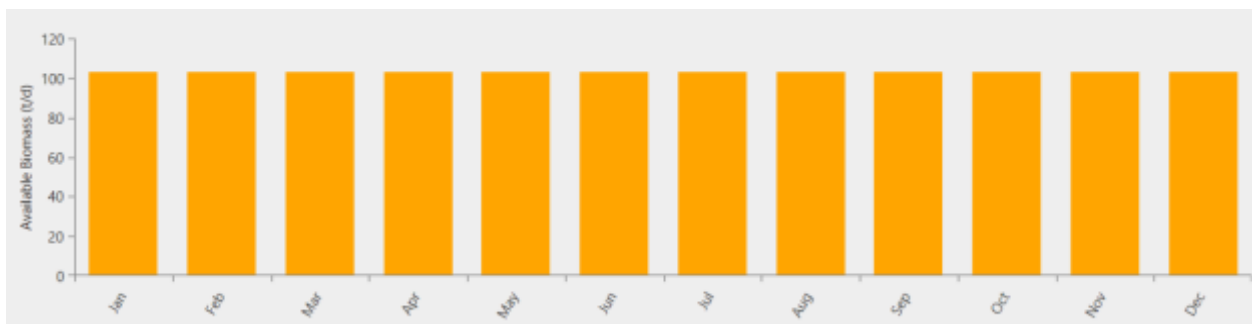


Figura 10. Produção de dejetos suínos para a granja Agromina

4.4. Especificação e modelo de dimensionamento dos componentes

4.4.1. Capacidade de geração das fontes

Para os cenários I e II, foram adotadas as potências nominais descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Capacidade de geração da fonte solar fotovoltaica e biomassa.

Potência dos componentes adotados no sistema	
Sistema solar fotovoltaico (cenário I)	264 kWp
Gerador a biogás (cenário II)	264 kWp

Para o cenário III, foram adotadas as potências nominais descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Capacidade de geração da fonte solar fotovoltaica e biomassa para o cenário III.

Potência dos componentes adotados no sistema	
Sistema solar fotovoltaico	0 kW a 1.000 kW
Gerador a biogás	0 kW a 500 kW

4.4.2. Eficiência do gerador a biogás

A eficiência para um gerador a biogás de 500 kW é de aproximadamente 32% em sua potência nominal de operação.

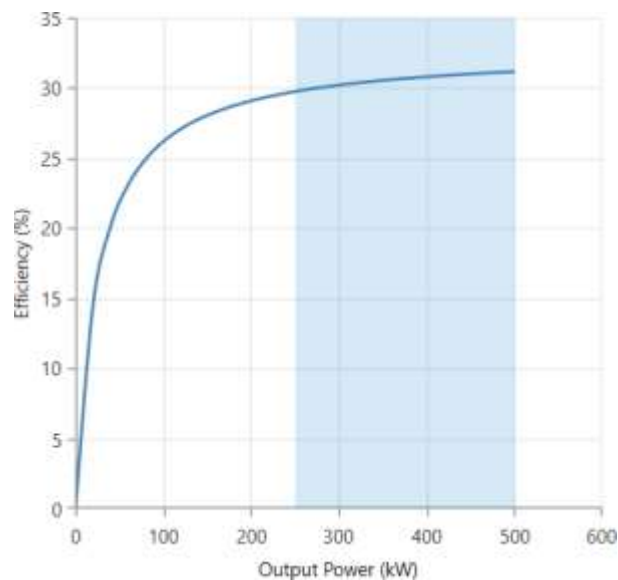


Figura 11. Eficiência do gerador a biogás de 500 kW na potência nominal de operação.

4.5. Análise econômica

4.5.1. Valor presente líquido total

O valor presente líquido inclui o valor total do sistema, como instalação e substituição, capital, combustível, operação e manutenção e outros custos relacionados ao longo da vida útil do projeto, considerando valor atual do sistema. Os indicadores de lucratividade do sistema é a partir do custo < 0 . Para os três cenários foram calculados os respectivos custos líquidos totais.

- Energia solar fotovoltaica conectada à rede;

O valor líquido total para a instalação do sistema fotovoltaico com a capacidade de 264 kWp é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. O valor líquido total para a instalação do sistema fotovoltaico

Custos relacionados ao sistema solar fotovoltaico conectado à rede	
Valor líquido total	R\$ 2.666.202,00
Valor anual	R\$ 228.788,00

- Gerador a biogás conectado à rede;

Avaliando os custos para o cenário II, obteve-se os respectivos valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Custo relacionados ao gerador a biogás conectado à rede

Custos relacionados ao gerador a biogás conectado à rede	
Valor líquido total	R\$ 5.260.000,00
Valor anual	R\$ 466.666,00

- Sistema solar fotovoltaico e biomassa conectado à rede.

Para o cenário III foram considerados pontos estratégicos no intervalo da potência nominal do sistema a fim de avaliar os pontos de otimização do sistema híbrido. A Figura 12 representa o valor total líquido do sistema.

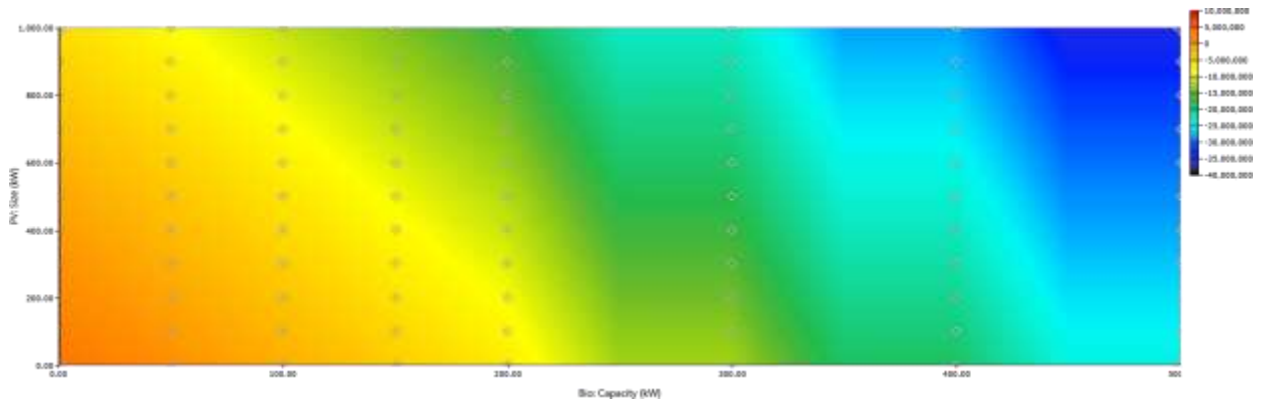


Figura 12. Valor líquido total do sistema solar fotovoltaico e biomassa.

4.5.2. Custo de energia

O custo da energia é definido como o custo médio de geração de energia elétrica dado em kWh. Considerando que à medida que o sistema varia em relação a capacidade de geração, os custos por kWh são alterados de maneira proporcional. Uma análise de custo de energia foi gerada para os três cenários, respectivamente.

- Energia solar fotovoltaica conectada à rede;

O custo para o sistema conectado à rede é de R\$ 0,3214 por kWh, uma vez que o sistema solar fotovoltaico não é suficiente para suprir a demanda local, é necessário importar energia da rede (concessionária).

- Gerador a biogás conectado à rede;

O sistema composto por um gerador a biogás mostrou ser capaz de fornecer energia elétrica o suficiente para a demanda local da granja de suínos. Portanto, uma vez que a produção é maior que a demanda, poderá ser realizada a exportação para a rede gerando a lucratividade de R\$ - 0,3694 por Kwh.

- Sistema solar fotovoltaico e biomassa conectado à rede.

O custo por kWh gerado entre as interações das fontes solar fotovoltaica e biomassa conectado à rede está descrito na Figura 13.

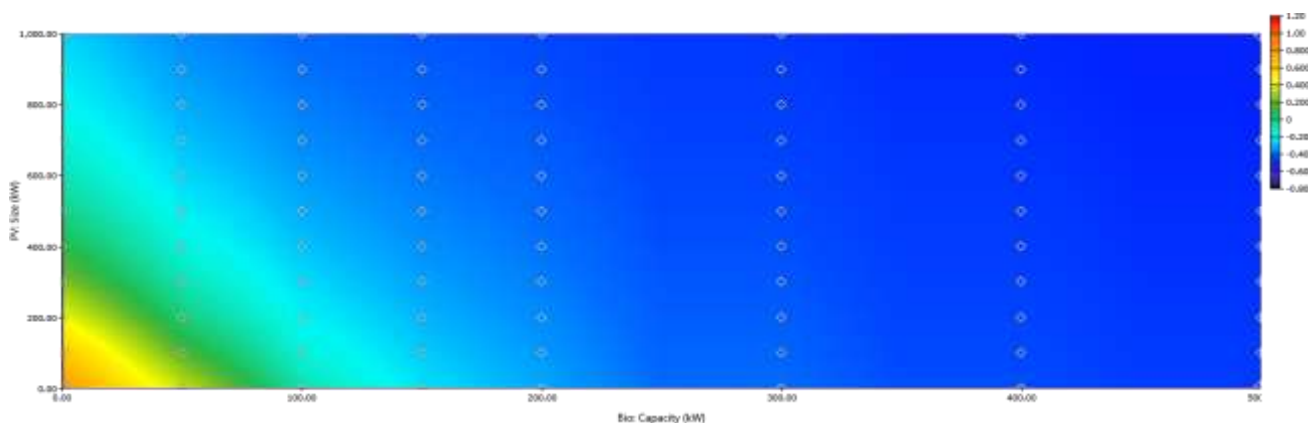


Figura 13. Custo por kWh para o sistema solar fotovoltaico e biomassa conectado à rede

4.5.3. Custo total de capital

O custo total de capital inclui todos os fluxos de caixa de um projeto de investimento somado ao valor do investimento inicial, porém para esse cálculo a taxa de desconto é aplicada. A totalidade do dimensionamento do custo prévio para os três sistemas é apresentado nas Tabelas 6 e 7 e Figura 14.

- Energia solar fotovoltaica conectada à rede;

Tabela 6. Custo total de capital para o sistema solar fotovoltaico

Custos relacionados ao sistema solar fotovoltaico conectado à rede	
Custo total	R\$ 2.592.624,00
Custo anual	R\$ 216.052,00

- Gerador a biogás conectado à rede;

Tabela 7. Custo relacionados ao gerador biogás conectado à rede

Custos relacionados ao gerador biogás conectado à rede	
Custo total	R\$ 5.186.422
Custo anual	R\$ 432.201,83

➤ Sistema solar fotovoltaico e biomassa conectado à rede.

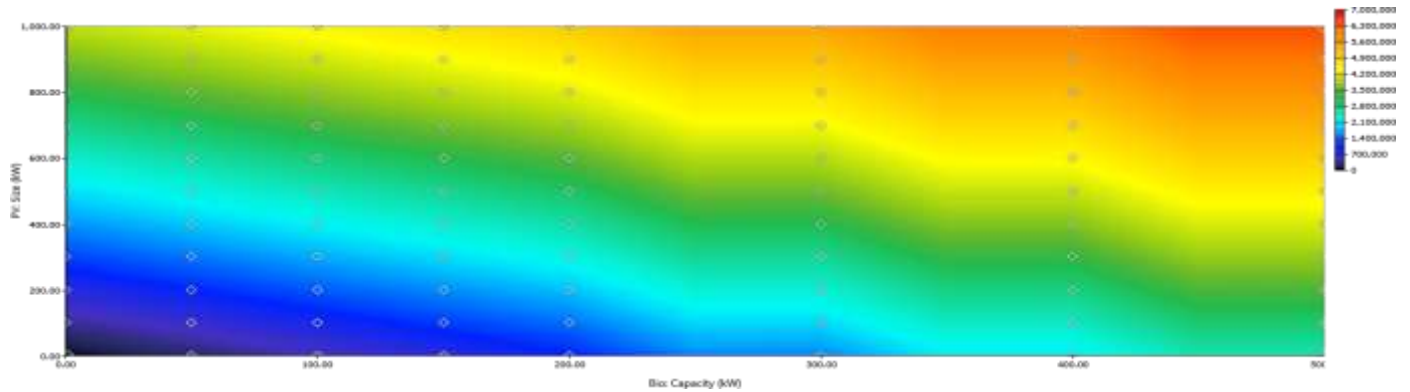


Figura 14. Custo total de capital para o sistema solar fotovoltaico

4.6. Geração das fontes

4.6.1. Geração da fonte solar fotovoltaica

Baseado nos bancos de dados inseridos no software Homer PRO, foi possível encontrar a geração da rede e da fonte solar fotovoltaica em um perfil anual, conforme a Figura 15 destaca.

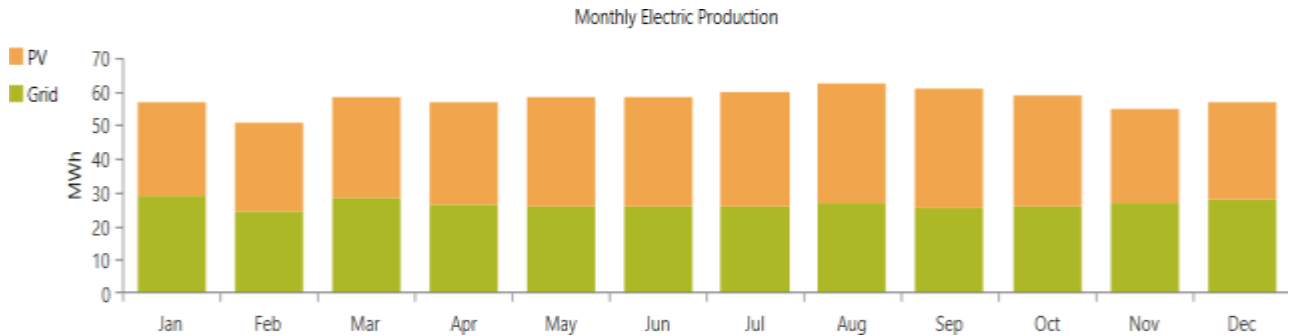


Figura 15. Geração de energia solar fotovoltaica conectada à rede

Para o primeiro cenário, a composição da geração da fonte solar fotovoltaica conectada à rede está representada na Tabela 8.

Tabela 8. Composição da geração da fonte solar fotovoltaica conectada à rede

Fontes	Geração (kWh/yr)	Composição (%)
Energia Solar Fotovoltaica	373.386	53,9
Rede	318.867	46,1

4.6.2. Geração da fonte biomassa

Para o cenário II, verificou-se que apenas geração de energia elétrica através do gerador de biogás conectado à rede foi o suficiente para suprir a demanda local da granja de suínos. Desse modo, não foi necessário importar energia da rede. A Figura 16 demonstra o comportamento da geração de energia, considerando o intervalo de um ano.

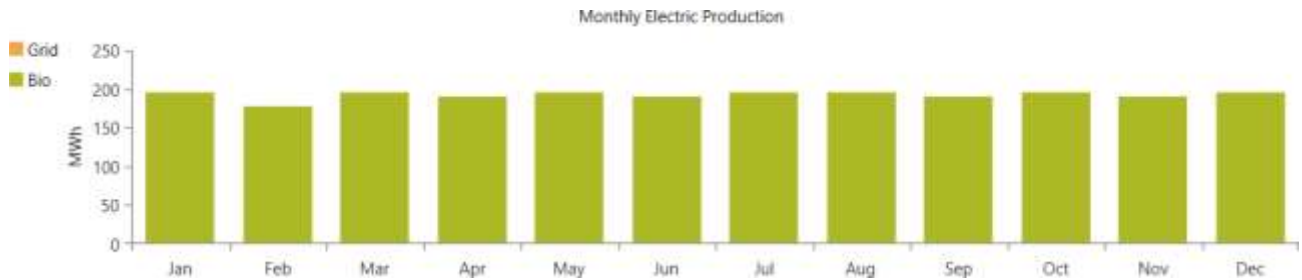


Figura 16. Geração da fonte biomassa conectada à rede.

A composição da geração de energia elétrica gerada para o cenário II é distribuída conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9. Composição da geração a biogás conectado à rede

Fontes	Geração (kWh/yr)	Composição (%)
Biomassa	2.312.640	100
Rede	0	0

4.6.3. Geração do sistema híbrido (solar fotovoltaica e biomassa).

A interação do sistema híbrido conectado à rede resulta na produção de energia elétrica anual descrita na Figura 17.

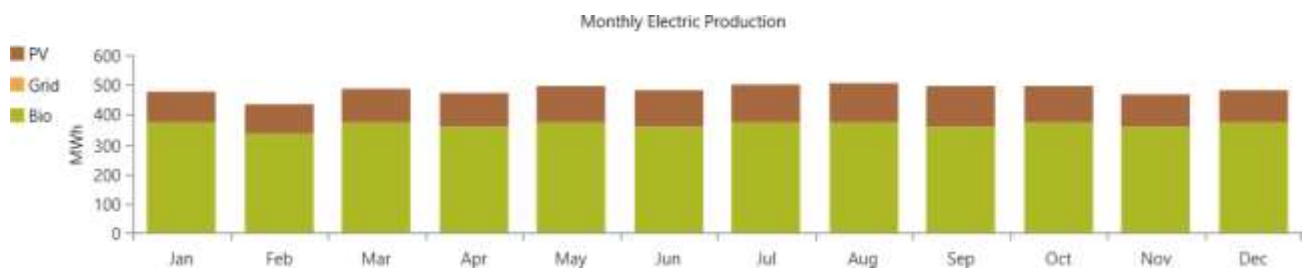


Figura 17. Geração do sistema híbrido (solar fotovoltaica e biomassa).

Dessa forma, a Tabela 10 descreve o valor da geração de energia elétrica em um perfil anual para o sistema híbrido proposto.

Tabela 10. Composição da geração do sistema híbrido (solar fotovoltaica e biomassa).

Fontes	Geração (kWh/yr)	Composição (%)
Energia Solar Fotovoltaica	1.414.341	24,4
Biomassa	4.380.000	75,6
Rede	0	0

5. CONCLUSÃO

Portanto, ao analisar a viabilidade técnico-econômica otimizada para um sistema híbrido de energia renovável, entre elas a fonte de energia solar fotovoltaica e biomassa, constatou-se que a região sul maranhense possui disponibilidade tanto em relação ao recurso da irradiância solar quanto aos resíduos agrícolas e animais. O software HOMER PRO foi utilizado para realizar um modelo de simulação que considerava três cenários possíveis de implementação das fontes renováveis, estas conectadas à rede da concessionária visando buscar um grau de complementaridade entre as fontes. Baseado em um estudo prévio realizado no ano de 2021, foram adotados parâmetros econômicos e energéticos para atender o perfil de carga médio de 1.437 kW. A biomassa introduzida no projeto refere-se a um gerador de biogás que possui a eficiência de 32% da potência nominal adotada.

A escolha dos cenários foi realizada adotando os seguintes critérios:

- Para o cenário I e II foi adotado o valor da potência de 264 kWp, este critério objetivou analisar as fontes solar fotovoltaica e biomassa. Entretanto, a avaliação é realizada individualmente, observando se a fonte é capaz de suprir a demanda energética exigida para o perfil de carga.
- Para o cenário III, foi adotado o sistema híbrido das duas fontes, onde a potência para os módulos fotovoltaicos foi considerada no valor de 1.000 kW, e 500 kW para o gerador a biogás. Analisando a composição que cada fonte contribui para o sistema.

Diante das análises realizadas no presente estudo, foi possível verificar que devido à intermitência da fonte solar fotovoltaica, o tempo de produção de energia elétrica está reduzido a 12 horas diárias aproximadamente, e por outro lado o gerador de biogás é capaz de produzir nas 24h diárias. Baseado na análise de sensibilidade realizada no software Homer Pro, verificou-se que somente a energia solar fotovoltaica conectada à rede não é capaz de suprir a demanda energética proposta, pois precisa importar da rede o custo de R\$ 0,3214 por kWh. O sistema tornou-se lucrativo em dois dos três cenários adotados, pois eram capazes de fornecer e exportar energia elétrica.

6. REFERÊNCIAS

BARBOSA, L.P. **Estudo do conceito *Net Zero Energy* para implantação de fontes de energia renováveis e aplicação em uma granja de suínos em Balsas-MA.** Universidade Federal do Maranhão.

BELING, R. R. **Anuário brasileiro da silvicultura.** Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2016.

CCEE. **Geração de Energia Elétrica: Dados do submercado Nordeste, UF Maranhão.** 2022. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/dados-e-analises/dados-geracao>. Acesso em: 25 fev. 2022.

CHANG, Keng-Hao; LOU, Kuo-Ren; KO, Chun-Han. Potential of bioenergy production from biomass wastes of rice paddies and forest sectors in Taiwan. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 460-476, 2019.

DINCER, Ibrahim. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 4, n. 2, p. 157-175, 2000.

EMBRAPA. **Árvore do Conhecimento: Cana de Açúcar.** 2017. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_97_22122006154841.html. Acesso em: 14 jul. 2021.

EPE. **Boletim Trimestral do Consumo de Eletricidade.** (2020). Ano 1, Número 2. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/boletim-trimestral-de-consumo-de-eletricidade>. Acesso em: 07/04/2022.

FELFLI, F. F et al. **Briquetagem de biomassa e suas perspectivas no Brasil.** Biomassa e bioenergia, v. 35, n. 1, pág. 236-242, 2011.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás na suinocultura**. 211f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2012.

GAO, Datong et al. The energy, exergy, and techno-economic analysis of a solar seasonal residual energy utilization system. **Energy**, p. 123626, 2022.

HASHIM, Haslenda et al. **Integrated biomass and solar town**: Incorporation of load shifting and energy storage. *Energy*, v. 75, p. 31-39, 2014.

IBGE. **Cidades e estados**: Área territorial brasileira 2020. IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma.html>. Acesso em: 6 jun. 2022.

IEA. **Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer**. 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/articles/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>. Acesso em: 17 mar. 2022.

JURASZ, Jakub et al. A review on the complementarity of renewable energy sources: Concept, metrics, application and future research directions. **Solar Energy**, v. 195, p. 703-724, 2020.

LI, Xian; WANG, Chi-Hwa. 2017 PV Danckwerts Memorial Lecture special issue editorial: Advances in emerging technologies of chemical engineering towards sustainable energy and environment: Solar and biomass. **Chemical Engineering Science**, v. 215, p. 115384, 2020.

MARAFON, A.C et al. Uso da Biomassa para a geração de energia. **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Docmentos (INFOTECA-E)**, 2016.

NASCIMENTO, R.S; ALVES, G. M. **Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: Métodos e benefícios ambientais**. XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência– Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

NETO, P.B; SAAVEDRA, O. R.; OLIVEIRA, D. Q. The effect of complementarity between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids. **Renewable Energy**, v. 147, p. 339-355, 2020.

NIXON, J. D.; DEY, P. K.; DAVIES, P. A. The feasibility of hybrid solar-biomass power plants in India. **Energy**, v. 46, n. 1, p. 541-554, 2012.

ONS. **Histórico da Operação de Energia**: Geração de energia. 2021. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-daoperacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 10 jul. 2021.

PEREIRA, Lucas B. et al. Sizing Multiple Non-Conventional Renewable Sources for Isolated Microgrids. In: **2019 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)**. IEEE, 2019. p. 1-6

PÉREZ-NAVARRO, A. et al. Experimental verification of hybrid renewable systems as feasible energy sources. **Renewable Energy**, v. 86, p. 384-391, 2016.

SIGA. **Sistemas de Informações de Geração da ANEEL**. 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWZmM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIImMiOjR9>. Acesso em: 15 mar. 2022.

STAND, L. Meriño; OCHOA, G. Valencia; FORERO, J. Duarte. Energy and exergy assessment of a combined supercritical Brayton cycle-orc hybrid system using solar radiation and coconut shell biomass as energy source. **Renewable Energy**, v. 175, p. 119-142, 2021.

YU, Jinna et al. The asymmetric nexus of solar energy and environmental quality: Evidence from Top-10 solar energy-consuming countries. **Energy**, v. 247, p. 123381, 2022.