

Revista Energia na AMAZÔNIA

VOL. 1 | N. 2 | JUL/DEZ 2024


CDEAM
20 ANOS



UFAM

APOIADORES



Reitor

SYLVIO MÁRIO PUGA FERREIRA

Vice-reitora

THEREZINHA DE JESUS PINTO FRAXE

Diretor do CDEAM

RUBEM CESAR RODRIGUES SOUZA

Coordenadora de Projetos e Captação de Recursos do CDEAM

MÁRCIA DRUMOND SARDINHA

Coordenador de Transferência de Resultados do CDEAM

HELDER CRUZ DA SILVA

Coordenador de Formação de Recursos Humanos do CDEAM

JEAN MACHADO MACIEL DA SILVA

Conselho Editorial da Revista Energia na Amazônia

Profa. Dra. Ângela Mari dos S. Costella

Prof. Dr. Antonio do Nascimento S. Alves

Profa. Dra. Caren Michels

Profa. Dra. Cristiane Daliassi R. de Souza

Prof. Dr. Danilo de Santana Chui

Prof. Dr. Helder Cruz da Silva

Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Junior

Prof. Dr. Jean Machado Maciel da Silva

Prof. Dr. João Caldas do Lago Neto

Profa. Dra. Joemes de Lima Simas

Prof. Dr. Leandro Aparecido Pocrifka

Prof. Dr. Nilton Pereira da Silva

Prof. Dr. Rubem Cesar Rodrigues Souza

Profa. Dra. Virginia Mansanares Giacon

Editora-chefe

Profa. Dra. Cristiane Daliassi Ramos de Souza

Capa e Editoração Eletrônica

Greice Vaz

Editorial

Prezados(as) leitores(as),

Conforme compromisso assumido estamos apresentando o segundo número da revista **Energia na Amazônia**. Este número é composto por quatro artigos. Um dos artigos trata das políticas públicas em desenvolvimento no Estado do Amazonas destinadas a impulsionar a adoção de fontes renováveis de energia, experiência esta que pode servir de estímulo para que a governança pública de estados e municípios siga o mesmo caminho. O segundo discute a inserção de energia solar fotovoltaica em comunidades indígenas na Amazônia. O terceiro contempla um estudo comparativo entre a geração de energia elétrica via biodigestão do aguapé e a solar fotovoltaica, contemplando aspectos técnicos, econômicos e socioambientais. O quarto artigo, por sua vez, contempla o estudo de três biomassas para produção de eletricidade em comunidades isoladas da Amazônia, propondo a rota da gaseificação para conversão energética.

A Revista Energia na Amazônia passa a contar, a partir deste número, com a Sessão **Energia em Pauta na UFAM**. Essa sessão será dedicada a divulgar ações relevantes em energia que estão ocorrendo no âmbito das instalações da UFAM relacionadas com o seu **Programa de Gestão Energética Institucional** aprovado pelo Conselho Universitário - CONSUNI no corrente ano.

Esperamos que as ideias aqui veiculadas possam fomentar reflexões e suscitar novas produções.

Boa leitura!

Profa. Dra. Cristiane Daliassi Ramos de Souza
Editora-chefe da revista **Energia na Amazônia**

REVISTA ENERGIA NA AMAZÔNIA

VOLUME 1 | NÚMERO 2 | JULHO/DEZEMBRO 2024

Ficha Catalográfica

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Revista Energia na Amazônia [recurso eletrônico] / Universidade Federal do Amazonas, Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM, v. 1, n. 2, jul/dez. Manaus, AM: CDEAM, 2024.

Semestral

Online

Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/energianaamazonia>

Títulos e resumos bilíngues (português/inglês)

Título abreviado: REA: Rev. Energ. Amazon.

1. Recursos energéticos - Pesquisa - Amazônia - Periódicos. 2. Energia - Fontes alternativas - Amazônia - Periódicos. 3. Desenvolvimento energético - Pesquisa - Amazônia - Periódicos. I. Universidade Federal do Amazonas. Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico II. Título

CDU (1976): 620.9(811)

(Catalogação realizada pela bibliotecária Maria Siméia Ale Girão – CRB11-284)
Biblioteca Central da UFAM

SUMÁRIO

- 11** ENERGIA EM PAUTA NA UFAM
- 14** ARTIGOS
- 15** REVISÃO DAS POLÍTICAS PÚBLICAS PARA PROMOÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NO ESTADO DO AMAZONAS
Cristiane Lucia de Freitas, Carla Kazue Nakao Cavaliero, Rubem Cesar Rodrigues Souza
- 27** ALTERNATIVAS DE FONTES DE ENERGIAS LIMPAS: TENDÊNCIAS E PERSPECTIVAS DE MELHORIAS PARA AS COMUNIDADES INDÍGENAS
Lucas Vieira Meirelles, Luís Cesar Ferreira Motta Barbosa
- 41** COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA DO AGUAPÉ E DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA A MMGD NO AMAZONAS NOS CONTEXTOS TÉCNICO, SOCIOAMBIENTAL E ECONÔMICO
Cristiane Lucia de Freitas, Carla Kazue Nakao Cavaliero
- 56** BIOMASS UTILIZATION FOR SUSTAINABLE ENERGY GENERATION IN ISOLATED AMAZONIAN COMMUNITIES
Fábio Cordeiro de Lisboa, Carlos Alberto Gurgel Veras, Augusto César de Mendonça Brasil

Energia em pauta na UFAM

A sessão Energia em Pauta na UFAM, que passa a integrar o conteúdo da Revista Energia na Amazônia, constitui-se em um espaço para divulgar como a temática energética está sendo desenvolvida no âmbito da UFAM de modo a estimular agentes públicos e privados a adotarem práticas semelhantes.

Por meio da Resolução CONSUNI nº 01, de 28 de fevereiro de 2024, foi instituído o Programa de Gestão Energética Institucional da Universidade Federal do Amazonas – PGEI/UFAM, a vigorar a partir de 18 de março de 2024. O PGEI/UFAM abrange as atividades de PLANEJAMENTO, MONITORAMENTO e UTILIZAÇÃO DA ENERGIA em suas diversas formas (eletricidade, combustíveis líquidos e gás), bem como no aproveitamento dos potenciais energéticos disponíveis, por meio de geração com fontes renováveis de energia e ações de eficiência energética, em todos os campi.

O objetivo do PGEI é IMPLEMENTAR e OPERACIONALIZAR a gestão energética institucional sistematizada, em todas as edificações e instalações existentes e a construir na UFAM, através de ações e propostas para o uso eficiente da energia e do aproveitamento de potenciais energéticos renováveis, integrando as propostas às áreas estratégicas da gestão, do ensino, pesquisa e da extensão, de acordo com o planejamento estratégico da universidade.

A governança do PGEI/UFAM está estruturada como segue:

- *Reitoria: instância deliberativa;*
- *Comitê de Energia: instância consultiva da reitoria. Seu regimento interno foi aprovado pelo Conselho de Administração da UFAM em 11 de julho de 2024. Cabe ao Comitê propor, implementar e acompanhar medidas de efficientização e sustentabilidade energética no âmbito da UFAM, bem como, controlar e divulgar informações pertinentes as suas ações. Este é constituído por 13 (treze) membros, conforme a Resolução CONSAD nº 23, de 11 de julho de 2024.*
- *Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM: Ao CDEAM, órgão suplementar da UFAM, instituído no ano de 2004, cabe a presidência do Comitê de Energia, bem como, a secretaria. Devido ao seu caráter técnico, e por força de seu regimento interno, emanará do Centro, prioritariamente, as orientações técnicas relativas à temática energia.*

É mister destacar que essa estrutura de governança para tratar a questão energética em instituições de ensino públicas ou privadas é pioneira no Brasil. A abordagem mais tradicional, consiste no desenvolvimento de projetos pontuais que emanam de pesquisadores isolados aos quais não é dada continuidade.

A primeira reunião do Comitê de Energia da UFAM ocorreu no dia 29 de novembro de 2024, destacando-se as seguintes deliberações:

- **Aprovação do lançamento da primeira versão do Boletim de Monitoramento das Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Energéticas da UFAM.** O boletim foi elaborado pelo CDEAM e, em sua primeira edição, constam informações de emissões somente relativas ao consumo de energia elétrica das unidades consumidoras cujas informações relativas ao ano de 2023 estavam disponíveis. Nas próximas versões pretende-se ampliar o escopo tanto das unidades consumidoras contempladas quanto dos energéticos, ou seja, incluindo combustível automotivo e GLP (gás de cozinha).
- Aprovação das Diretrizes para elaboração do Plano de Transição Energética da UFAM. As diretrizes propostas pelo CDEAM consistem no alicerce para desenvolvimento de um Plano para Transição Energética na UFAM, o qual se alinha com os compromissos internacionais assumidos pelo governo federal no âmbito dos problemas climáticos.

ARTIGOS



REVISÃO DAS POLÍTICAS PÚBLICAS PARA PROMOÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NO ESTADO DO AMAZONAS

REVIEW OF THE PUBLIC POLICIES FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES PROMOTION IN ELECTRICITY GENERATION IN THE STATE OF AMAZONAS

Cristiane Lucia de Freitas¹, Carla Kazue Nakao Cavaliero², Rubem Cesar Rodrigues Souza³

¹Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM, Departamento de Eletricidade, Manaus, AM, e Programa de Pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. E-mail: cristianefreitas@ufam.edu.br

²Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica/Departamento de Energia, Campinas, SP, Brasil.

³Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM, Departamento de Eletricidade, Manaus, AM

Resumo

A adoção das fontes renováveis de energia no setor elétrico promove a diversificação da matriz elétrica, podendo oportunizar o desenvolvimento tecnológico e social local. Este artigo contém o resultado do levantamento e análise de ações que se constituem, em verdade, em políticas públicas para estimular o seu uso no estado do Amazonas. A pesquisa permitiu identificar algumas ações, dentre as quais a criação da Política Estadual de Incentivo ao Aproveitamento de Fontes Renováveis de Energia e Eficiência Energética (Lei nº 5.350/2020), na qual foram previstas medidas para impulsionar o desenvolvimento energético do estado. Tais medidas podem proporcionar à região geração de emprego e renda, desenvolvimento de parque industrial de tecnologias de energias renováveis e redução dos custos de logística de transporte de combustível. No entanto, estão estagnadas devido à falta de organização da governança estadual para colocar em prática as medidas previstas em lei.

Palavras-Chave: Políticas públicas. Fontes renováveis de energia. Geração de energia elétrica. Amazonas.

Abstract

The adoption of renewable energy sources in the electrical sector promotes the diversification of the electrical matrix, which can provide opportunities for local technological and social development. This article contains the results of the survey and analysis of actions that constitute public policies to encourage its use in the state of Amazonas. The research made it possible to identify some actions, including the creation of the State Policy for Incentives for the Use of Renewable Energy Sources and Energy Efficiency (Law nº 5,350/2020), in which measures were foreseen to boost the state's energy development. Such measures can provide the region with generation of employment and income, development of an industrial park for renewable energy technologies and reduction in fuel transport logistics costs. However, they

are stagnant due to the lack of organization of state governance to put into practice the measures provided for by law.

Keywords: Public policies. Renewable energy sources. Electricity generation. Amazon.

1. Introdução

As políticas públicas são ações adotadas pelo governo e organizações sociais, com a finalidade de sanar problemas da sociedade garantindo que os direitos, previstos pela legislação, sejam atendidos e permitindo melhor qualidade de vida. De acordo com Werner e Lazaro (2023), as políticas públicas do setor energético devem envolver a elaboração de mercados, instituições e cadeias de abastecimento para que haja incentivos às fontes renováveis de energia; e ainda romper barreiras, como a conscientização e aceitação, por parte da população, sobre as tecnologias de energia renovável, e a escassez de recursos humanos qualificados, que se constituem em fatores essenciais para que as tecnologias que fazem uso das fontes renováveis consigam um lugar de destaque no mercado de energia.

Uma matriz elétrica quando baseada em combustíveis fósseis e com uso de tecnologias pouco eficientes, produz impactos ambientais em toda a cadeia de produção, contribuindo com o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e, conseqüentemente, com as mudanças climáticas. Segundo dados do SEEG (2022), o setor energético contribuiu com quase 18% do total de emissões nacionais (total de 2,32 GtCO_{2eq}). Este percentual não é tão alto devido à oferta interna de energia elétrica ser baseada em sua maioria nas fontes renováveis, representando 85,2% em 2022 (EPE, 2023). Entretanto, a oferta interna de energia elétrica do Amazonas tem um perfil diferenciado. O mercado brasileiro de energia elétrica é suprido pelo Sistema Interligado Nacional (SIN) e por Sistemas Isolados (SISOL)¹. A capacidade instalada (outorgada) em operação do SIN no Amazonas, em abril de 2024, era de 1,49 GW e do SISOL 0,6 GW. Em relação às usinas instaladas no SIN, 80,4% usam fonte de origem fóssil e 19,6% fonte de origem renovável, sendo, deste total, 93,7% de energia hidráulica, 5,8% de biomassa e 0,5% de energia solar (ANEEL, 2024). Em relação ao SISOL, 84,9% das usinas utilizam óleo diesel, 15,1% gás natural e uma parcela insignificante utiliza energia solar fotovoltaica como fonte. No mesmo período a capacidade instalada em usinas solares em sistemas de geração distribuída foi de 181,4 MW.

Entende-se que a promoção das fontes renováveis de energia como alternativa às fontes convencionais para a produção de eletricidade deve ocorrer através de medidas que contribuam

¹ O estado foi conectado ao SIN em 2013 e, até abril de 2024, somente seis, dos 62 municípios foram conectados ao SIN.

para solucionar questões energéticas, ambientais e socioeconômicas para alcançar o desenvolvimento sustentável. Isso significa: (i) alinhá-la com o desenvolvimento de novas tecnologias no setor energético e com redefinições das políticas energéticas, de forma a contribuir para a criação de um mercado que comporte essas tecnologias (Reis, 2017); (ii) garantir a inclusão social, ao permitir o acesso à eletricidade em regiões ainda não eletrificadas; e (iii) combater as desigualdades, possibilitando a geração de emprego e renda para a população local.

O presente estudo contempla uma revisão das políticas públicas que foram e estão sendo desenvolvidas em nível nacional e estadual voltadas à promoção das tecnologias de energias renováveis, com foco na geração de eletricidade no estado do Amazonas.

2. Metodologia

Para alcançar o objetivo foram levantadas informações junto à literatura, órgãos governamentais e instituições sobre a legislação vigente e projetos de lei, programas atuais, governança estadual, além de linhas de crédito existentes junto às instituições bancárias, dentre outras instituições.

3. Políticas para promoção das fontes renováveis de energia no estado do Amazonas

3.1 Políticas nacionais

As políticas nacionais que tiveram impacto na promoção das energias renováveis no estado se referem a programas instituídos por leis e decretos, e ações como fundos para financiamento e linhas de crédito.

3.1.1 Programas nacionais

- **Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM):** criado pelo Decreto nº 2.793/1994, o Programa teve como objetivo incentivar a adoção de sistemas energéticos utilizando fontes disponíveis localmente como pequenos aproveitamentos hidrelétricos, energia solar, eólica e da biomassa para o atendimento das demandas básicas das comunidades ainda não atendidas pela energia elétrica da rede convencional (Brasil, 1994). As ações desenvolvidas no estado do Amazonas resultaram em 206 sistemas solares fotovoltaicos instalados até o ano de 2002 (Vale *et al.*, 2012), e na implantação em laboratórios de energias renováveis na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Amazonas (UFAM)².

² Uma descrição das ações do PRODEEM junto à UFAM consta do primeiro volume da Revista Energia na Amazônia, acessível no site: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/energiاناamazonia/issue/view/660>.

- **Programa Luz para Todos (PLpT):** o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Luz para Todos foi instituído pelo Decreto nº 4.873/2003 com o objetivo de fornecer atendimento em energia elétrica às populações no meio rural (MME, 2024) através da extensão de redes convencionais e por sistemas de geração de energia elétrica descentralizados, com redes isoladas ou sistemas individuais (Art. 6º do Decreto nº 4.873/2003). Quanto ao desenvolvimento do PLpT no estado do Amazonas, a proposta de universalização da oferta de energia elétrica ocorreu em quase sua totalidade através da extensão de redes de distribuição, em localidades que permitiam este formato, e até 2023 foram atendidas 145.000 unidades consumidoras (AmE, s.d.). Foram também instaladas 12 miniusinas solares com mini rede de distribuição em seis municípios, como projetos piloto de sistemas instalados em regiões remotas, no entanto, não há conhecimento de outras usinas instaladas para o atendimento dessas localidades. Em 2023 o PLpT foi relançado através do Decreto nº 11.628, de 04 de agosto de 2023, com a inclusão de novos objetivos, agregando as ações do Programa Mais Luz para a Amazônia.
- **Marco legal da microgeração e minigeração distribuída:** publicada através da Resolução Normativa (REN) nº 482/2012, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estabeleceu-se as primeiras regras para os sistemas de micro e minigeração distribuída (MMGD) e o sistema de compensação de energia. Alterações das regras foram realizadas através das Resoluções Normativas nº 687/2015, e nº 786/ 2017. Em 06 janeiro de 2022 entrou em vigor a Lei Federal nº 14.300, que instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS) (ANEEL, 2023), tendo sido regulamentada pela Resolução Normativa da ANEEL nº 1.059/2023. Até maio de 2024, havia 10.774 sistemas MMGD registrados no Amazonas, sendo que deste total há o registro de uma usina eólica e o restante de usinas fotovoltaicas (ANEEL, 2024). As unidades instaladas estão distribuídas em 49 municípios, com pouco mais de 91% das instalações na cidade de Manaus.
- **Programa Mais Luz para a Amazônia (MLA):** o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica na Amazônia Legal - Mais Luz para a Amazônia (MLA) foi instituído através do Decreto nº 10.221 de 05 de fevereiro de 2020 objetivando o fornecimento de energia elétrica a partir, exclusivamente, de tecnologias de origem renovável. Prioridade foi dada ao atendimento da população das

regiões remotas sem acesso ao serviço público de energia elétrica e que tenham geração de energia elétrica utilizando fonte não renovável. A previsão é atender às demandas do meio rural até o final de 2026, e das regiões remotas da Amazônia Legal até o final de 2028. Para a primeira fase a meta era instalar 4.459 sistemas no estado do Amazonas entre 2020 e 2022 e na segunda fase a meta consistia na instalação de 7.258 no período entre 2023 e 2024 (MME, 2020), no entanto não foram encontrados registros consolidados da quantidade de instalações realizadas no âmbito deste programa. Os objetivos e ações inerentes ao Programa MLA foram incorporados ao relançamento do Programa Luz para Todos e o Decreto nº 10.221/2020, foi revogado pelo Decreto nº 11.628/2023.

3.1.2 Fundos para financiamento e linhas de crédito

Investimentos em projetos de energia renovável exigem um capital inicial elevado durante um curto tempo para a implementação. Os fundos de financiamento fornecem apoio a investidores que não possuem todo o capital necessário e as linhas de crédito são facilitadores para os investidores que não possuem o capital inicial para este investimento. Em nível nacional pode-se destacar os fundos listados a seguir.

- **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES):** o BNDES possui linhas de crédito para o financiamento de projetos na área de energias renováveis, sendo as principais delas capazes de financiar sistemas completos ou os equipamentos de geração de energia elétrica mais importantes. Destacam-se o Programa Fundo Clima - Transição Energética, Programa Fundo Clima Automático, Finem - Geração de energia, Finame - financiamento de máquinas e equipamentos, Pronaf ABC+ Bioeconomia, e Pronaf Agroindústria. No estado do Amazonas há cerca de 160 projetos financiados pelo Finem e Finame entre os anos de 1998 e 2024, no entanto, na descrição dos projetos não foi identificada a aplicação para fontes renováveis de energia, impossibilitando quantificar o número de projetos direcionados a este setor.
- **Linhas de crédito bancário:** além das parcerias com o BNDES, as instituições bancárias possuem suas linhas de crédito próprias para financiamento de sistemas de energia renovável, sendo que a maior parte são voltadas para sistema solar fotovoltaico. De forma geral, as linhas de crédito podem ser direcionadas à pessoa física e correntista ou a produtores rurais, como pessoa física ou jurídica. Não foi possível encontrar dados quantitativos de projetos financiados através das linhas de crédito bancárias, muito

embora estas sejam apresentadas por empresas aos interessados em adquirir sistemas para geração distribuída, o que ajuda a alavancar negócios.

3.2 Políticas estaduais

3.2.1 Políticas e ações desenvolvidas

No estado do Amazonas há ações envolvendo diferentes órgãos e instituições que atuam em conjunto na implementação de políticas estaduais para o desenvolvimento do setor energético e a promoção das fontes renováveis de energia, as quais são descritas nesta seção.

- **Conselho Estadual de Energia do Amazonas (CEEN):** criado através da Lei nº 3.782/2012, como órgão consultivo de natureza permanente da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Amazonas, tem como objetivo “[...] participar da formulação e implantação da política energética do Estado do Amazonas e acompanhar as atividades decorrentes de sua execução, sugerindo medidas que visem adequá-la periodicamente, [...]” (Amazonas, 2012, p.1). O CEEN ficou inoperante após 2 anos de sua criação e em abril de 2023 foi reativado e reestruturado, tendo suas ações retomadas pela Secretaria Executiva de Mineração, Energia, Petróleo e Gás (SEMEP), no âmbito da Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação (SEDECTI), como instrumento do governo estadual para impulsionar a política energética no estado. O CEEN é composto, além das secretarias do estado, por membros da sociedade civil, inclusive de instituições de ensino superior e tecnológico, como as Universidades Estadual e Federal do Amazonas, Instituto Federal e Centro de Educação Tecnológica do Amazonas e Fórum Permanente das Secretarias Municipais do Meio Ambiente, no entanto ainda não há participação de um ator do governo federal. Em maio de 2023 foi aprovado pelos membros do CEEN o regimento interno e a criação de duas Câmaras Temáticas que apresentaram proposta para o marco legal da política energética estadual e da lei para criação do Fundo Estadual de Energia (SEDECTI, 2023a).
- **Fórum Permanente de Energia (FPE):** criado no âmbito da UFAM por meio do Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico (CDEAM), órgão suplementar da universidade que vem atuando desde 2004 com ações que buscam solucionar a problemática energética da região amazônica brasileira através do desenvolvimento de projetos de pesquisa e desenvolvimento, de cursos de especialização em fontes renováveis de energia e eficiência energética, de consultorias na área energética e de estudos para implantação de política energética na região. O FPE foi lançado em 14 de

março de 2019 com objetivo de atuar na proposição de “[...] políticas públicas para o desenvolvimento do setor energético do estado do Amazonas e disseminar informações sobre o setor energético” (CDEAM, 2019). Suas ações são direcionadas para o estado do Amazonas e é composto por atores da academia deste e de outros estados, de agentes dos governos federal, estadual e municipal, das companhias de energia, da Federação das Indústrias, de institutos, dentre outros. Foi gestada no âmbito deste Fórum a Lei No. 5.350/2020 relativa a fontes renováveis de energia e eficiência energética.

- **Política Estadual de Incentivo ao Aproveitamento de Fontes Renováveis de Energia e Eficiência Energética:** instituída pela lei estadual 5.350/2020, tal ação previu, dentre diversos objetivos, o estímulo às fontes renováveis de energia através de investimentos e implantação de sistemas de geração de eletricidade; ao desenvolvimento e o uso de tecnologias limpas; incentivos ao estabelecimento de indústrias para o atendimento do setor; criação de emprego e renda; melhoria no aproveitamento energético; e mitigação de impactos ambientais negativos (AMAZONAS, 2020). Cabe ao estado implementar a política, concedendo incentivos fiscais e financeiros, apoiando a pesquisa para inovação tecnológica, promovendo campanhas de conscientização sobre as tecnologias, incentivando a formação de recursos humanos, dentre outros instrumentos. Foi prevista a criação do Fundo de Desenvolvimento Energético do estado do Amazonas (por lei específica) como mecanismo de fomento ao desenvolvimento energético sustentável da região.
- **Marco legal da Política Energética Estadual:** em 04 de agosto de 2023 foram referendadas, pelo governo estadual, duas minutas com as propostas de lei do marco legal da política energética estadual e da proposta de lei de criação do Fundo Estadual de Energia, ambas desenvolvidas pelos membros do CEEN. Segundo a SEDECTI (2023b), essa política irá incentivar o uso racional das fontes renováveis de energia no estado refletindo na diversificação da matriz energética e resultando no desenvolvimento sustentável da região. Sua importância reside em fornecer acesso garantido à energia a um preço acessível, e o fundo fomentará os investimentos em energia renovável, que refletirá, também, na geração de emprego e renda.
- **Governança do setor energético estadual:** a governança do setor energético no estado do Amazonas começou a ser estruturada mediante as ações desenvolvidas pela da Secretaria Executiva de Mineração, Energia, Petróleo e Gás (SEMPEP), que atuava no âmbito da SEDECTI. No ano de 2023, a SEMPEP foi extinta e criada a Secretaria de

Energia, Mineração e Gás (SEMIG), ficando responsável pelas ações inerentes à criação e implementação de políticas públicas para o setor energético do estado, (AMAZONAS, 2023a), e que atualmente está coordenando as ações do CEEN.

- **Política Estadual de Incentivo ao Uso de Biomassa para a Geração de Energia:** instituída pela Lei nº. 6.598/2023, inclui, dentre as diversas diretrizes e objetivos traçados, o incentivo ao uso da biomassa como fonte de energia renovável para a produção de energia elétrica. Para a implementação das ações previstas, a lei permite a adoção de diversos instrumentos, como o desenvolvimento de pesquisa, do ensino e da qualificação profissional no setor de agentes públicos e privados, promoção de incentivos fiscais, dentre outros (AMAZONAS, 2023b).

3.2.2 Fundos para financiamento e linhas de crédito

A Agência de Fomento do estado do Amazonas (AFEAM), possui duas linhas de crédito para financiamento de projetos em energia: o programa “Mais crédito energia sustentável”, destinado a produtores do estado; e o “Programa AFEAM energia solar”, destinado à pessoa física que possui atividade econômica no estado (AFEAM, s.d.).

O Banco da Amazônia, possui a linha de crédito Energia Verde, que financia projetos de energias renováveis em empreendimentos rurais, para consumo próprio, para os estados da região amazônica (Banco da Amazônia, s.d.).

4. Discussão sobre as ações no estado do Amazonas

O PRODEEM, o PLpT e o Programa MLA representam tentativas de levar tecnologias de energias renováveis às populações não atendidas na zona rural e em localidades remotas. As ações desenvolvidas pelo PRODEEM no Amazonas tiveram baixa efetividade no que se refere à quantidade de sistemas instalados. Embora com participação exclusiva de tecnologias de fontes renováveis, que poderia refletir de forma positiva sob o ponto de vista ambiental, por exemplo, e com atendimento também às unidades consumidoras comunitárias, apresentou diversos problemas que o impediram de ter sido continuado, dentre eles, problemas de gestão nas fases finais do programa, como descrito por Vale *et al* (2012).

O PLpT não conseguiu alcançar todas as regiões remotas no Amazonas, ainda que houvesse tecnologias alternativas para geração de energia elétrica já difundidas e que não dependiam do transporte regular de combustível. O atendimento pelo programa ocorreu, praticamente, através de extensão da rede elétrica convencional, como já mencionado anteriormente, com grande preocupação no cumprimento das metas estabelecidas e fornecendo

a energia elétrica em quantidade³ e qualidade discutíveis. Do ponto de vista econômico, o acesso à energia elétrica poderia agregar geração de renda ao consumidor e à comunidade através do uso de equipamentos facilitadores para o beneficiamento de produções locais, e não há registros de que o programa tenha realizado esse incentivo no estado. Contudo, observa-se que a falta de um planejamento voltado às necessidades locais e a urgência na obtenção de resultados, em conjunto com a limitação da quantidade de energia elétrica por unidade consumidora, acabam se tornando uma barreira para que essas ações de agregação de renda possam ser incentivadas nas localidades. Ao avaliar do ponto de vista ambiental, as ações do PLpT no Amazonas resultaram no aumento das emissões de GEE, devido ao aumento na demanda de combustível pelas usinas a óleo diesel. Registre-se que não foram mantidas as condições de operação para os projetos pilotos com energia solar fotovoltaico. Com a renovação do PLpT em 2023, os objetivos (Art. 2º - Decreto nº 11.628/2023) também foram direcionados à sustentabilidade na oferta da energia elétrica, à inclusão social, à redução das desigualdades, descarbonização, dentre outros (MME, 2024), agregando as ações e metas pertencentes ao Programa MLA.

No caso das políticas estaduais, o governo do Amazonas tem buscado criar um sistema de governança e estabelecer um arcabouço legal contando com o apoio do FPE para impulsionar o desenvolvimento no setor energético estadual. No entanto, não é célere nos processos, como é o caso das ações propostas através da Lei nº 5.350/2020, que, após três anos e meio de sua publicação, não têm um decreto regulamentador e proposição de lei para a criação do Fundo de Desenvolvimento Energético do estado. Além disso, instituiu a Lei nº 6.598/2023, incentivando o aproveitamento da biomassa para fins energéticos, sendo que as proposições da Lei nº 5.350/2020 já contemplam o aproveitamento de todas as fontes renováveis de energia e, até a data de elaboração deste estudo, não houve a publicação das propostas de lei relacionadas ao Marco legal da Política Energética Estadual. Isto demonstra que ainda são necessários ajustes na governança da esfera estadual, sobretudo para que as ações previstas na Lei nº 5.350/2020 possam ser executadas a contento. Nesse sentido, pode-se destacar ações que já deveriam estar sendo operacionalizadas, como o desenvolvimento tecnológico regional e o incentivo ao estabelecimento de um parque industrial de tecnologias de energias renováveis, dado os incentivos atualmente existentes para indústrias no estado do Amazonas.

³ O fornecimento de energia elétrica às UCs via PLpT tinha como foco a iluminação, comunicação e refrigeração, com quantidade prevista discutível. Mais detalhes podem ser vistos no Manual de Operacionalização do PLpT Disponível na página: https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Manual%20de%20Operacionaliza%C3%A7%C3%A3o_v6.pdf

Na esfera municipal não foram encontrados registros de políticas municipais e ações sendo desenvolvidas no setor de energias renováveis, no entanto, é necessário que sejam estimulados para mudarem a postura adotada na atualidade. No ano de 2021, o Instituto Energia e Desenvolvimento Sustentável (INEDES) desenvolveu o guia de Políticas Energéticas Regionais para orientar, no âmbito da gestão pública municipal, quanto ao uso de energias renováveis e eficiência energética. O guia também incluiu a criação de um marco legal de política energética municipal, de um conselho municipal de energia, de um fundo municipal de energia e de um plano municipal de desenvolvimento energético (INEDES, 2021), que atuarão como um instrumento facilitador para os municípios desempenharem, de forma mais ativa, ações voltadas ao setor, sem depender das ações do estado ou da União.

5. Conclusões

Programas nacionais de incentivo às fontes renováveis demonstraram formas de incorporar políticas públicas no estado, porém sem muita efetividade. Observou-se que há uma tentativa significativa em criar uma governança estadual e articulações estão sendo feitas para alcançar uma política energética consistente no estado, como ocorreu com a criação da Lei estadual nº 5.350/2020, que prevê diversas medidas de promoção às fontes renováveis buscando um desenvolvimento tecnológico que impactará todas as dimensões da sociedade. No entanto, ações para criar um arcabouço legal estão sendo atropeladas por novas leis que já constam em leis anteriores, refletindo num atraso substancial em decisões para tornar as medidas já propostas, de fato, em ações concretas.

O governo federal desenvolve ações dissociadas das ações do governo estadual. As ações voltadas ao planejamento e desenvolvimento de políticas energéticas no estado contam com importante contribuição dos membros do CEEN, no entanto não há participação de ator(es) do governo federal, o que pode impactar na efetividade nas ações desenvolvidas em ambas as frentes. Além disso, foi observada uma postura coadjuvante dos municípios na adoção de iniciativas para a promoção das fontes renováveis de energia para geração de energia elétrica.

6. Referências

AFEAM. **Mais crédito energia sustentável.** Amazonas, s.d. Disponível em: <<https://www.afeam.am.gov.br/afeam-energia-sustentave>>. Acesso em: 01 mai. 2024.

Amazonas. **Lei nº 3.782 de 20 de julho 2012.** Diário Oficial do Estado do Amazonas, de 20 de jul. Disponível em: <<https://diario.imprensaoficial.am.gov.br/portal/visualizacoes/pdf/14262/#/p:1/e:14262>>. Acesso em: 16 mai. 2024.

Amazonas. **Lei nº 5.350 de 22 de dezembro de 2020.** Diário Oficial do Estado do Amazonas, 22 de dez. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=406837>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

Amazonas. **Estrutura organizacional - Secretarias**. Amazonas, 2022. Disponível em: <<https://www.transparencia.am.gov.br/estrutura-organizacional/>>. Acesso em: 21 jun. 2024.

Amazonas. **Lei nº 6.225, de 27 de abril de 2023**. Diário Oficial do Estado do Amazonas, 27 de abr. Manaus, 2023a. Disponível em: <<https://diario.imprensaoficial.am.gov.br/portal/visualizacoes/pdf/17179/#/p:8/e:17179>>. Acesso em: 21 jun. 2024.

Amazonas. **Lei nº 6.598 de 27 de novembro de 2023**. Diário Oficial do Estado do Amazonas, 27 nov. Manaus, 2023b. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=452482>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

AmE. Amazonas Energia S/A. **Programa de eletrificação rural**. Manaus, s.d. Disponível em: <<https://website.amazonasenergia.com/informacoes/programa-luz-para-todos>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

ANEEL. **Micro e minigeração distribuída**. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

ANEEL. **Sistema de Informações da geração da ANEEL - SIGA**. Relatório interativo: Brasília, 2024. Acesso em: 17 abr. 2024.

ANEEL. **Registro de Unidades com geração distribuída**. Relatório interativo: Brasília, 2024. Acesso em: 17 abr. 2024.

Banco da Amazônia. **Energia Verde**. Pará, s.d. Disponível em: <www.bancoamazonia.com.br/rural/energia-verde>. Acesso em: 14 mai. 2024.

BNDES. **Catálogo completo de soluções financeiras**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento>. Acesso em: 13 mai. 2024.

CDEAM. **Fórum Permanente de Energia FPE/UFAM**. Manaus, 2019. Disponível em: <<https://www.cdeam.ufam.edu.br/programas/83-fpe-ufam.html>>. Acesso em: 09 mai. 2024.

EPE. Empresa de pesquisa energética. **Balanco Energético Nacional 2023 - Ano base 2022**. Disponível em: <www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 02 mai. 2024.

IEMA. Instituto de Energia e Meio Ambiente. **Exclusão elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem acesso à energia elétrica?** São Paulo, 2020. Disponível em: <energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/02/relatorio-amazonia-2021-bx.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2024.

INEDES. **Políticas energéticas regionais**. Disponível em: <<http://www.inedes.org.br/index.php/guias-de-politicas-energetica-downloads>>. Acesso em: 23 mai. 2024

MME. **Termo de compromisso da Amazonas Energia para implantação do Programa Mais Luz para a Amazônia**. Brasília, 2020. Disponível em: <www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/copy2_of_programa-de-eletrificacao-rural/acompanhamento-dos-atendimentos-nos-estados/amazonas>. Acesso em: 22 abr. 2024.

MME. **Normativos do PLpT**. Brasília, 2024. Disponível em: <www.gov.br/mme/pt-br/destaques/Programa%20Luz%20para%20Todos/normativos>. Acesso em: 18 abr. 2024.

Reis. Lineu Belilo. **Geração de energia elétrica**. 3ª ed. – ver., ampl. e atual- Barueri: Manole, 2017.

SEDECTI. **Conselho Estadual de Energia avança na criação da política energética do Amazonas**. Manaus, 2023a. Disponível em: <www.SEDECTI.am.gov.br/conselho-estadual-de-energia-avanca-na-criacao-da-politica-energetica-do-amazonas/>. Acesso em: 16 mai. 2024.

SEDECTI. **Conselho Estadual de Energia referenda minutas de lei que norteiam a política energética do Amazonas**. Manaus, 2023b. Disponível em: <www.SEDECTI.am.gov.br/conselho-estadual-de-energia-referenda-minutas-de-lei-que-norteiam-a-politica-energetica-do-amazonas/>. Acesso em: 28 jun. 2024.

SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Banco de dados de emissões totais nacionais e por estado. 2022.** Disponível em: < <https://plataforma.seeg.eco.br/>>. Acesso em: 17 abr. 2024.

Vale, S. B. *et al.* A experiência obtida com os projetos de geração com fontes renováveis de energia na região norte do Brasil: do PRODEEM aos projetos especiais das concessionárias. **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar.** São Paulo, 2012.

Werner, D. Lazaro, L. L. B. The policy dimension of energy transition: The Brazilian case in promoting renewable energies (2000–2022). **Energy Policy.** Volume 175 (2023).



**ALTERNATIVAS DE FONTES DE ENERGIAS LIMPAS: TENDÊNCIAS E
PERSPECTIVAS DE MELHORIAS PARA AS COMUNIDADES INDÍGENAS**

***ALTERNATIVE CLEAN ENERGY SOURCES: TRENDS AND PROSPECTS FOR
IMPROVEMENTS FOR INDIGENOUS COMMUNITIES***

Lucas Vieira Meirelles¹, Luís Cesar Ferreira Motta Barbosa²

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil. E-mail: lucas.meirelles@aluno.cefet-rj.br.

² Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil. E-mail: luis.barbosa@cefet-rj.br.

Resumo

A Amazônia abriga cerca de 440 mil indígenas distribuídos em mais de 180 povos, ocupando cerca de 110 milhões de hectares. As terras indígenas são cruciais para proteger os direitos e a identidade desses povos, cujas práticas ajudam a preservar a floresta e seus recursos. A pesquisa visa estudar a implementação de sistemas de energia limpa e mobilidade sustentável nessas comunidades, considerando seus valores culturais, ambientais e necessidades específicas de infraestrutura e transporte. O uso de energias renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica de baixo impacto, pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis, minimizando a pressão sobre os recursos naturais e ajudando a mitigar as mudanças climáticas. Essas comunidades enfrentam desafios logísticos devido à localização remota, afetando o acesso a serviços básicos. A pesquisa será baseada em uma revisão da literatura existente sobre comunidades indígenas, energia limpa e logística, identificando lacunas e áreas onde mais pesquisa é necessária. Um projeto de extensão desenvolvido no Cefet/RJ, envolvendo uma embarcação movida a energia solar, será uma solução viável para regiões cortadas por rios.

Palavras-Chave: Desenvolvimento Sustentável. Comunidades Indígenas. Energias Limpas. Logística.

Abstract

The Amazon is home to around 440,000 indigenous people distributed among more than 180 tribes, occupying approximately 110 million hectares. Indigenous lands are crucial for protecting the rights and identity of these peoples, whose practices help preserve the forest and its resources. The research aims to study the implementation of clean energy systems and sustainable mobility in these communities, considering their cultural, environmental values, and specific infrastructure and transport needs. The use of renewable energy, such as solar, wind, and low-impact hydropower, can reduce dependence on fossil fuels, minimizing pressure on natural resources and helping to mitigate climate change. These communities face logistical challenges due to their remote locations, affecting access to basic services. The research will be based on a review of the existing literature on indigenous communities, clean energy, and logistics, identifying gaps and areas where further research is needed. An extension project developed at Cefet/RJ, involving a solar-powered boat will be a viable solution for regions traversed by rivers

Keywords: Sustainable Development. Indigenous Communities. Clean Energy. Logistics.

1. Introdução

A busca por alternativas de fontes de energias limpas e sustentáveis tem se tornado cada vez mais relevante, especialmente quando consideramos comunidades indígenas localizadas em regiões remotas, como na Amazônia. As comunidades indígenas que habitam a Amazônia enfrentam desafios únicos devido à sua localização em uma das regiões de vasta biodiversidade e ecologicamente sensíveis do mundo.

Essa situação impacta diretamente na vida dessas comunidades e dificulta seu acesso a serviços básicos. Sendo assim, a preservação do meio ambiente e a melhoria da qualidade de vida das populações nativas são aspectos essenciais a serem abordados. Este artigo explora as tendências e perspectivas de implementação de sistemas de energia limpa e mobilidade sustentável nessas comunidades, levando em consideração não apenas as necessidades energéticas específicas, mas também os valores culturais e ambientais únicos dessas populações. Na Amazônia brasileira, há exemplos bem-sucedidos de co-gestão que resultaram em benefícios ecológicos significativos, possíveis graças à proteção territorial realizada por comunidades locais, muitas das quais estão situadas em pequenos centros urbanos (PAES; MICHEL & CAMPOS-SILVA, 2021).

Ao analisar criticamente a literatura disponível e identificar lacunas no conhecimento atual, busca-se fornecer insights valiosos para promover soluções adaptadas às realidades locais, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável, a preservação dos recursos naturais e o fortalecimento social e econômico dessas comunidades indígenas. Hampl (2024) argumenta que a participação ativa das comunidades no planejamento e na implementação de projetos de energia renovável é crucial para garantir que essas soluções sejam culturalmente apropriadas e sustentáveis a longo prazo. Portanto, este trabalho explora as tendências e perspectivas das fontes de energias limpas, com foco nas melhorias de vida em comunidades indígenas na Amazônia, destacando os desafios e oportunidades na transição para um futuro energético sustentável e inclusivo, adotando-se uma abordagem holística e integrada, para o desenvolvimento de soluções adaptadas às realidades locais, considerando as práticas culturais e ambientais únicas das comunidades indígenas.

Com os objetivos definidos, buscou-se responder três perguntas:

- Q1: Quais são as barreiras logísticas, culturais e institucionais e os impactos nas comunidades indígenas?

- Q2: De que maneira a integração de valores culturais e ambientais das comunidades indígenas pode influenciar positivamente a aceitação e a eficácia dos projetos de energia renovável na Amazônia?

- Q3: Quais são os impactos sociais, econômicos e ecológicos observados nas comunidades indígenas que adotaram sistemas de energia limpa e mobilidade sustentável na Amazônia, e como esses impactos podem ser ampliados para beneficiar mais comunidades?

2. Fundamentação Teórica

O capítulo 2, intitulado "Fundamentação Teórica," está dividido em três seções principais que abordam os desafios e soluções para a sustentabilidade em comunidades indígenas na Amazônia, com foco em energia limpa e economia circular.

2.1 Desafios logísticos nas comunidades indígenas e um estudo de caso: Projeto Xingu Solar

As comunidades indígenas no Brasil enfrentam diversos desafios que dificultam o acesso a serviços básicos, incluindo eletricidade. Esses desafios são amplamente discutidos na literatura, destacando a exclusão socioeconômica e a localização remota dessas comunidades, que resultam em infraestrutura precária e oportunidades econômicas limitadas (PROENÇA & PANOSSO, 2022). A falta de eletricidade impacta negativamente em vários aspectos da vida diária, desde a capacidade de realizar atividades econômicas até o acesso a serviços essenciais como saúde e educação.

Segundo Proença e Panosso (2022), as comunidades indígenas muitas vezes não têm acesso a redes elétricas convencionais devido à sua localização geográfica isolada. Isso não só limita o desenvolvimento econômico, mas também coloca as comunidades em desvantagem significativa em termos de qualidade de vida. A falta de eletricidade também dificulta a conservação de alimentos e medicamentos, afetando diretamente a saúde e segurança alimentar das populações indígenas.

Baseado nesses fatores, foi realizado pelo IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente), um estudo de caso desenvolvido sobre a inserção de 70 sistemas fotovoltaicos em 65 comunidades do Território Indígena do Xingu até o início de 2019, o chamado projeto Xingu Solar. A análise cobre os resultados, aprendizados e desafios do projeto, além de discutir as vantagens e desvantagens técnico-econômicas das tecnologias de geração de eletricidade a diesel, solar e híbrida para atender à demanda de energia elétrica no Xingu.

Os principais objetivos do projeto incluíam a implementação de sistemas de geração solar em escolas, postos de saúde, associações indígenas e centros comunitários, demonstrando

a viabilidade técnica da tecnologia solar, aumentando a oferta de eletricidade para uso comunitário e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Além disso, o projeto visou treinar as comunidades indígenas para operar, instalar e realizar a manutenção dos sistemas solares, promovendo a autonomia tecnológica e a segurança no uso da eletricidade e desenvolver estratégias comunitárias para o uso e administração da energia gerada, incentivando o uso consciente da energia e garantindo segurança energética nas aldeias

Entre os resultados positivos, destaca-se o aumento da disponibilidade de energia nas comunidades. A instalação de sistemas solares permitiu o uso de aparelhos como lanternas e celulares. Além disso, a tecnologia solar demonstrou ser mais fácil de operar e manter em comparação aos geradores a diesel, devido à ausência de partes móveis e à não necessidade de combustível. As comunidades demonstraram capacidade de realizar manutenções preventivas básicas e resolver problemas menores, o que contribuiu para a autonomia e resiliência das aldeias. A maior disponibilidade de energia melhorou a sensação de segurança energética, especialmente em emergências.

A formação técnica e o empoderamento comunitário também foram pontos positivos do projeto. O treinamento para a operação e manutenção dos sistemas solares capacitou os moradores e aumentou o interesse pela tecnologia. A formação de especialistas locais fortaleceu a autonomia das comunidades em relação à gestão dos sistemas de energia.

O projeto enfrentou desafios, tendo em vista que muitas comunidades ainda dependem de geradores a diesel devido à alta demanda energética e à capacidade limitada dos sistemas solares instalados. Além disso, há uma necessidade de maior capacitação técnica para garantir a manutenção e operação a longo prazo. A dependência anterior de geradores a diesel, que eram caros a curto prazo e frequentemente falhavam devido à má manutenção. A manutenção desses geradores era difícil e custosa, enquanto os sistemas solares exigem menos manutenção e são mais duráveis. A capacitação das comunidades para operar e manter os sistemas solares foi essencial. Os impactos do projeto incluem uma redução da dependência de diesel e gasolina, aumento na disponibilidade de eletricidade, especialmente para carregar dispositivos como celulares e lanternas, e melhorias na qualidade de vida nas comunidades beneficiadas. A transição completa do diesel para a energia solar ainda não foi alcançada em todas as comunidades devido à alta demanda energética, e a necessidade contínua de treinamento e suporte técnico é fundamental para garantir a operação e manutenção adequadas dos sistemas solares.

2.2 Economia Circular

Desde a revolução industrial a sociedade segue inserida em um modelo de economia linear, onde o acesso aos recursos, que antes eram escassos, tornou-se disponíveis e baratos, tendo como resultado um incrível aumento na produtividade e na qualidade de vida. Mas, tamanha eficiência teve seu preço, o consumo e a produção passaram a ocorrer de forma exponencial, irresponsável e inconsciente como se os recursos fossem ilimitados.

Sendo assim, o conceito de economia circular propõe manter o valor dos recursos extraídos e produzidos em circulação por meio de cadeias produtivas integradas. Nesse contexto, o destino de um material não é mais apenas uma questão de gerenciamento de resíduos, mas parte integrante do processo de design de produtos e sistemas. O objetivo central é aumentar a eficiência do uso de recursos, com ênfase especial na gestão de resíduos urbanos e industriais, visando alcançar um equilíbrio e harmonia mais sólidos entre economia, meio ambiente e sociedade (WEBSTER, 2015). A abordagem da economia circular busca criar um ciclo contínuo onde os recursos são reutilizados, reciclados e valorizados, reduzindo assim a dependência de recursos naturais finitos e minimizando os impactos ambientais.

A adoção de práticas sustentáveis na gestão de resíduos pode ser adaptada para o setor energético, promovendo a utilização de recursos renováveis de maneira mais eficiente. A energia solar é uma das alternativas mais viáveis para comunidades indígenas devido à sua abundância e capacidade de ser instalada em áreas remotas. Paschoalin et al. (2019) destacam que a energia solar não só proporciona uma fonte de energia sustentável, mas também pode ser integrada a outras iniciativas de desenvolvimento comunitário, como a produção agrícola sustentável e a educação ambiental. Essa integração é crucial para garantir que as soluções de energia limpa sejam adequadas às necessidades e contextos culturais das comunidades indígenas.



Figura 1. Fluxo da economia linear

Fonte: Allen (2018).



Figura 2. Fluxo da economia circular

Fonte: Allen (2018).

2.3 Sustentabilidade

A sustentabilidade é um conceito fundamental que busca equilibrar o desenvolvimento econômico, a preservação ambiental e o bem-estar social, com o objetivo de atender às necessidades das gerações presentes sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades.

Segundo Savitz e Weber (2014), a sustentabilidade envolve a condução de negócios que não apenas evitem a degradação do meio ambiente, mas também contribuam para sua restauração, minimizando os impactos negativos sobre o ambiente e seus habitantes. Ser sustentável significa operar uma empresa considerando as necessidades e interesses de todas as partes envolvidas, fortalecendo suas relações e promovendo benefícios mútuos. Compreender a importância da preservação da natureza é fundamental para a humanidade, tanto quanto manter relações sociais saudáveis e promover o desenvolvimento econômico.

Sendo assim, para atender às demandas de inovação mais inteligente, é necessário um esforço adicional para garantir benefícios econômicos, métodos organizacionais e relações externas (KEMP; PEARSON, 2008, p. 7). A eco inovação é definida como a introdução de novos produtos, processos, serviços ou métodos de negócios que reduzem os impactos ambientais e o uso de recursos em comparação com alternativas relevantes (KEMP; PEARSON, 2008, p. 7). Os efeitos econômicos das inovações são mais previsíveis do que os efeitos sociais e ambientais, que são mais complexos de serem avaliados devido a variáveis, incertezas e interações (SCHOT; GEELS, 2008). O desenvolvimento sustentável requer mudanças técnicas e sociais. Nas comunidades indígenas da Amazônia, a sustentabilidade é intrinsicamente ligada, pois essas comunidades estão profundamente ligadas ao seu ambiente natural. A adoção de práticas sustentáveis pode ajudar a preservar a biodiversidade, proteger os

recursos naturais e fortalecer a resiliência das comunidades frente às mudanças ambientais e sociais.

2.4 Ferramentas da qualidade

As ferramentas da qualidade são métodos e técnicas amplamente utilizadas em processos de gestão para monitorar, analisar e melhorar produtos, serviços ou sistemas. Elas são indispensáveis para organizações que buscam excelência operacional, redução de falhas e aumento da satisfação dos clientes. Embora sejam métodos antigos, as ferramentas da qualidade continuam sendo relevantes no cenário atual, tanto no setor industrial, devido à sua ampla aplicabilidade e baixo custo, quanto no meio acadêmico, pela sua praticidade. Além disso, a adoção dessas ferramentas contribui para a melhoria dos indicadores de qualidade e da reputação das empresas no mercado (VISVESHWAR, 2017).

Segundo Toledo et al. (2013), a utilização de ferramentas da qualidade com o objetivo de medir, analisar e propor soluções para aprimorar os processos, visando melhorar o desempenho da empresa, é um fator essencial nas organizações. Como consequência, a qualidade dos produtos e serviços aumenta, melhorando a experiência dos clientes e fortalecendo a reputação da empresa no mercado. Esse reconhecimento não apenas atrai novos clientes, mas também fideliza os existentes, criando um ciclo positivo de crescimento e inovação.

As ferramentas da qualidade são indispensáveis para analisar processos, identificar causas de problemas e implementar melhorias de forma estruturada e eficaz. Contudo, sua aplicação não depende apenas de conhecimento técnico. Segundo Oliveira (1995), cabe aos profissionais a arte de combiná-las, criando abordagens e possibilidades.

Sendo assim, é necessário atender a condições fundamentais: Clareza, Conhecimento, Colaboração, Coleta de Informações, Comprometimento e Cultura de Melhoria, sintetizando-se nos 6C. Essas condições servem como pilares para o uso eficiente dessas ferramentas, garantindo que seus resultados sejam consistentes e sustentáveis.

➤ **Clareza**

Antes de aplicar qualquer ferramenta, é necessário definir de forma clara e objetiva o problema a ser resolvido ou o objetivo a ser alcançado.

➤ **Conhecimento**

A eficácia no uso das ferramentas depende do entendimento do processo em análise e do domínio técnico da ferramenta escolhida.

- **Colaboração**
Participação ativa da equipe multidisciplinar a identificar causas de problemas e propor soluções robustas, aproveitando o potencial coletivo.
- **Coleta de Informações**
Base para decisões precisas. Sem informações consistentes, qualquer diagnóstico ou solução corre o risco de ser inadequado ou ineficaz.
- **Comprometimento**
O apoio da liderança e o engajamento da equipe são indispensáveis. Aplicar ferramentas da qualidade requer tempo, esforço e, muitas vezes, recursos.
- **Cultura de Melhoria**
O aperfeiçoamento contínuo dos processos, proporcionando um ambiente onde essas ferramentas são aplicadas com eficiência, garantindo melhorias sustentáveis.

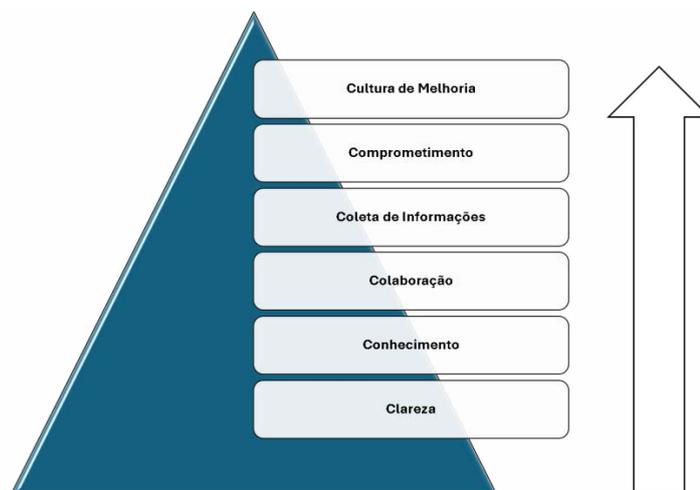


Figura 3. Representação gráfica dos 6C

Fonte: Autoria própria.

No cenário abordado, essas ferramentas emergem como instrumentos indispensáveis para estruturar processos e promover a eficiência e a sustentabilidade das ações. O contexto das comunidades indígenas, caracterizado por desafios logísticos, culturais e institucionais, exige abordagens sistemáticas para viabilizar soluções que respeitem as especificidades locais. Nesse sentido, o uso do plano 5W1H destaca-se como uma ferramenta estratégica para o planejamento e execução de projetos de energia renovável.

2.4.1 Plano 5W1H

O plano 5W1H é uma ferramenta amplamente utilizada no planejamento e na execução de projetos, sendo uma variação simplificada do 5W2H. Sendo assim, é essencial para estruturar um planejamento de forma clara e objetiva. Ela reúne elementos fundamentais que detalham: o que será realizado; quem será responsável pela execução; o prazo para a realização; o local de aplicação ou impacto; a justificativa para a ação; o método ou estratégia de implementação.

De acordo com Lenzi, Kiesel e Zucco (2010, p. 185), o plano de ação 5W1H permite considerar todas as tarefas a serem executadas ou selecionadas de forma cuidadosa e objetiva, assegurando sua implementação de forma organizada. O plano 5W1H responde questões fundamentais, como o que será realizado, quem será responsável, quando será implementado, onde será aplicado, por que a ação é necessária e como será executada. Por exemplo, na implementação de sistemas solares em comunidades indígenas, pode-se definir que o objetivo principal é melhorar o acesso à energia renovável (o que), com a responsabilidade compartilhada entre lideranças comunitárias e técnicos treinados (quem), dentro de um cronograma estabelecido (quando), em comunidades específicas da Amazônia (onde), para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e promover a sustentabilidade (por que), utilizando tecnologias adequadas e capacitação técnica contínua (como).

5W1H					
O que?	Por quê?	Onde?	Quando?	Quem?	Como?
Adequação das rotas do entregador às distâncias dos clientes	Evitar que o entregador fique indo e vindo fazendo rotas não estratégicas	Administrativo	Imediato	Proprietários da Pizzaria	Segregando os clientes em subgrupos de acordo com a distância e elaborando rotas estratégicas para cada grupo
Adequação dos prazos de entrega às distâncias dos clientes	Conscientizar clientes mais distantes de um prazo de entrega mais longo	Administrativo	Imediato	Proprietários da Pizzaria	Segregando os clientes em subgrupos de acordo com a distância e estipulando tempos de entrega diferentes para cada grupo
Contratação de mais um entregador terceirizado	Descentralizar as entregas de um único motoqueiro	Administrativo	Imediato	Proprietários da Pizzaria	Colocação de cartazes de contratação e divulgando a vaga para conhecidos
Projeção de necessidade de matéria prima futura	Evitar compras de quantidades insuficientes de insumo	Setor de produção	Semanalmente	Proprietários da Pizzaria	Elaborar uma projeção semanal da quantidade de insumo necessária com base no histórico de gastos
Controle e organização dos estoques de matéria prima	Evitar atrasos por não encontrar a matéria prima em local de fácil acesso	Cozinha	Diariamente	Proprietários da Pizzaria	Conferência e organização dos estoques
Controle e organização da armazenagem dos utensílios	Evitar atrasos por não encontrar os utensílios em local de fácil acesso	Almoxarifado	Diariamente	Proprietários da Pizzaria	Conferência e organização do almoxarifado
Preparação de massas congeladas semi-prontas para o final de semana	Reduzir a sobrecarga dos pizzaiolos durante o final de semana	Setor de produção	Imediato	Proprietários da Pizzaria	Preparação e congelamento de 15 massas por dia (terça a quinta) para serem utilizadas no final de semana
Elaboração de um procedimento/receita padrão para confecção das pizzas	Evitar o uso de quantidades diferentes de insumo em cada pizza	Setor de produção	Imediato	Proprietários da Pizzaria	Elaborar um manual de instruções para a elaboração de cada sabor de pizza, contendo ingredientes e modo de preparo

Figura 4. Exemplo de aplicação do Plano 5W1H.

Fonte: Silva *et al.* (2018).

3. Metodologia

De acordo com Lima e Mioto (2007), é essencial definir claramente os procedimentos metodológicos e métodos utilizados em um trabalho, detalhando as fontes e apresentando os vieses que compõem a investigação e análise propostas. Richardson (2000) complementa essa ideia, afirmando que o método científico é a forma pela qual a sociedade valida um conhecimento adquirido empiricamente. Isso significa que qualquer pesquisador, ao utilizar os mesmos métodos científicos para a mesma investigação, deve chegar a resultados semelhantes.

A estratégia para o desenvolvimento deste trabalho foi baseada em uma pesquisa bibliográfica que abrangeu diversos temas e diferentes níveis de profundidade em cada um deles. Considerando a intenção de utilizar o enfoque sistêmico como método de abordagem para a compreensão e discussão dos fenômenos aqui investigados, é fundamental estabelecer uma sequência lógica na própria pesquisa bibliográfica. Noronha e Ferreira (2000) destacam, em sua análise da produção bibliográfica, a importância da temporalidade nas áreas temáticas. Foram pesquisadas bibliografias nacionais e internacionais sobre os temas relacionados às energias limpas, sustentabilidade em comunidades indígenas, integração de valores culturais em projetos de energia renovável, e estudos de caso de implementação de sistemas de energia limpa em regiões remotas. Moreira (2004, p. 21) observa que, no contexto informacional, as revisões de literatura desempenham uma função orgânica crucial, complementando assim os índices e as bibliografias especializadas. A análise focou em entender as tecnologias mais adequadas, os desafios logísticos e as barreiras culturais, bem como os impactos sociais, econômicos e ambientais dessas iniciativas. Para complementar a análise foi feito o uso da ferramenta da qualidade o 5WIH. Após a apresentação da fundamentação teórica, uma conclusão com análise crítica dos temas abordados, atendendo ao objetivo de identificar tendências e perspectivas na implementação de soluções energéticas sustentáveis em comunidades indígenas na Amazônia.



Figura 5. Fluxo da metodologia

Fonte: Autoria própria.

4. Análise

Para sintetizar os conceitos discutidos, foi elaborado um quadro de análise comparativo, utilizando os seguintes filtros: Princípios, onde se aplica, principais dimensões do conceito e principais indicadores. Este quadro destacou as diferentes abordagens e indicadores utilizados para avaliar a sustentabilidade, a economia circular e a eficácia dos projetos de energia limpa, proporcionando uma visão clara das estratégias e resultados obtidos em diferentes contextos.

Como complemento a aplicação do plano 5W1H para estruturar as iniciativas de maneira clara, garantindo alinhamento entre os objetivos dos projetos e as realidades das comunidades indígenas. Essa ferramenta é especialmente relevante para projetos complexos, como os de implementação de sistemas de energia renovável, ao promover um planejamento sistemático, adaptado às necessidades locais e orientado para resultados mensuráveis.

Tabela 1. Análise comparativa de conceitos

Princípios	Onde se aplica	Principais dimensões conceituais	Principais Indicadores
Sustentabilidade	Comunidades indígenas e projetos de energia limpa	Ambiental, Social, Econômico	Redução de emissões de CO ₂ , Acesso a energia renovável, Desenvolvimento comunitário
Economia Circular	Gestão de resíduos, Design de produtos e sistemas	Reutilização, Reciclagem, Valorização de recursos	Taxa de reciclagem, Redução de resíduos, Eficiência no uso de recursos
Projeto Xingu Solar	Território Indígena do Xingu	Técnica, Econômica, Social, Educacional	Número de sistemas instalados, Redução da dependência de diesel, Formação de técnicos locais, Disponibilidade de energia

Fonte: Autoria própria

Instalação de sistemas solares fotovoltaicos: Parcerias com empresas de energia renovável para o fornecimento de equipamentos e instalação, com acompanhamento técnico de engenheiros especializados.

Capacitação técnica: Formação de membros da comunidade para a instalação, operação e manutenção dos sistemas solares, garantindo a autonomia a longo prazo.

Monitoramento e avaliação: Acompanhamento dos impactos do projeto por meio de indicadores como a redução do uso de diesel e a melhoria na qualidade de vida das comunidades, com apoio de ONGs para a coleta de dados e avaliação de resultados.

Fonte: Autoria própria

5. Conclusões

A análise detalhada da literatura sobre alternativas de fontes de energias limpas em comunidades indígenas revela um panorama complexo, mas repleto de potencial transformador. As comunidades indígenas enfrentam desafios significativos em termos de acesso à energia, que impactam diretamente sua qualidade de vida e desenvolvimento socioeconômico. A falta de infraestrutura elétrica não apenas limita atividades econômicas e acesso a serviços essenciais, mas também perpetua ciclos de pobreza e exclusão social. Nesse sentido, a aplicação conjunta do 5W1H foi um bom ponto de partida para organizar as ações de maneira eficiente, com foco nas questões fundamentais que determinam o sucesso de um projeto: o que será feito, quem está envolvido, quando as ações ocorrerão, onde serão implementadas, por que são necessárias e como serão realizadas. A combinação de uma estratégia de planejamento eficiente com uma análise detalhada dos custos pode garantir a execução real do projeto.

Diante desses desafios, as energias renováveis, emergem como soluções viáveis e promissoras. A energia solar, por sua abundância e facilidade de implementação em áreas remotas, pode fornecer uma fonte de eletricidade sustentável e confiável, essencial para o desenvolvimento dessas comunidades. A adoção de tecnologias solares não só proporciona benefícios imediatos em termos de eletrificação, mas também abre portas para o desenvolvimento de outras atividades sustentáveis, como a agricultura e a educação ambiental, promovendo assim a autossuficiência energética e econômica.

Em síntese, a transição para energias limpas em comunidades indígenas não é apenas uma questão de sustentabilidade ambiental, mas também de justiça social e econômica. A energia solar, quando implementada com um planejamento logístico eficiente e uma abordagem participativa, tem o potencial de transformar vidas, promovendo autonomia, resiliência e

desenvolvimento sustentável. Portanto, é imperativo que políticas públicas e iniciativas privadas se unam para apoiar a implementação de projetos de energia renovável em terras indígenas, garantindo um futuro mais justo e sustentável para essas comunidades.

6. Referências

Allen, A. Economia Linear, Economia Circular e Blockchain. 09 de julho de 2018. Disponível em <<http://www.acriacao.com/economia-linear-economia-circular-e-blockchain/>>.

HAMPL, M. Renewable Energy Projects in Indigenous Communities: Cultural Appropriateness and Long-Term Sustainability. **Journal of Clean Energy Studies**, 2024.

IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente). **Projeto Xingu Solar: Relatório de Resultados**. IEMA, 2019.

Kemp, R.; Pearson, P. Final report: European IPPC **Bureau project on environmental innovation**. The Hague: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, 2008.

Lenzi, F. C.; Kiessel, Daniel M.; Zucco, F. D. **Ação empreendedora: como desenvolver e administrar o seu negócio com excelência**. São Paulo: Gente, 2010.

Lima, T.C. S.; Miotto, R. C. T. Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica. **Revista Katalysis**, v. 10, p. 35-45, 2007.

Moreira, W. Revisão de literatura e desenvolvimento científico: conceitos e estratégias para confecção. **Janus**, Lorena, ano 1, n. 1, 2º sem. 2004.

Noronha, D. P.; Ferreira, S. M. S. P. Revisões de literatura. In: Campello, B. S.; Condón, B. V.s; Kremer, J. M. (Org.). Fontes de informação para pesquisadores e profissionais Belo Horizonte: UFMG, 2000.

Oliveira, S. T. **Ferramentas para o aprimoramento da qualidade**. São Paulo: Pioneira, 1995. 115 p. (Série: Qualidade Brasil.).

Paes, L. J.; Michel, C. C.; Campos-Silva, J. V. Co-management and Environmental Benefits in the Brazilian Amazon. **Journal of Environmental Management**, 2021.

Paschoalin Filho, J. et al. Solar Energy as a Sustainable Solution for Remote Communities. **Renewable Energy Reviews**, 2019.

Proença, C.; Panosso N., A. Challenges of Electricity Access in Indigenous Communities in Brazil. **Journal of Indigenous Studies**, 2022.

Richardson, R. J. Pesquisa social: métodos e técnicas. **São Paulo: Atlas, 2000. 334 p.**

Savitz, A. W.; Weber, K. The Tiple Bottom Line: How Today's Best-Run Companies Are Achieving Economic, Social and Environmental Success - and How You Can Too. **San Francisco, California: Jossey-bass: A Wiley Brand, 2014. 352 p.**

Schot, J.; Geels, F. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. **Research Policy**, v. 37, n. 9, p. 1258-1275, 2008.

Silva, B.; Viegas, A.; Sanches Junior, P.; Diniz, L. **Aplicação do MASP: um estudo de caso de pizzaria em Belo Horizonte**. 2018.

Toledo, JC de *et al.* **Qualidade: gestão e métodos**. Rio de Janeiro: LTC, p. 48-62, 2013.

Meirelles L. V. & Barbosa L. C. F. M., Rev. Energia Am., Manaus, v.01, n.02, (Jul-Dez) p.1-15, 2024.

Visveshwar, N. et al. Application of Quality Tools in a Plastic Based Production Industry to achieve the Continuous Improvement Cycle. **Calitatea**, v. 18, n. 157, p. 61, 2017.

Webster, K. The Circular Economy: A Wealth of Flows. 2. ed. Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2015.



COMPARAÇÃO ENTRE O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA DO AGUAPÉ E DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA A MMGD NO AMAZONAS NOS CONTEXTOS TÉCNICO, SOCIOAMBIENTAL E ECONÔMICO

COMPARISON BETWEEN THE POTENTIAL FOR ELECTRICITY PRODUCTION FROM THE BIOMASS OF WATER HYACINTH AND THE PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM FOR MMGD IN AMAZONAS IN TECHNICAL, SOCIO-ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC CONTEXTS

Cristiane Lucia de Freitas¹, Carla Kazue Nakao Cavaliero²

¹Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM, Departamento de Eletricidade, Manaus, AM, e Programa de Pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. E-mail: cristianefreitas@ufam.edu.br

²Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica/Departamento de Energia, Campinas, SP, Brasil.

Resumo

O aproveitamento da biomassa do aguapé para a Microgeração e Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica (MMGD) e Sistema de Compensação de Energia elétrica (SCEE) pode ser uma rota energética alternativa para o estado do Amazonas. Para avaliar as potencialidades de uso dessa biomassa na produção de biogás através da biodigestão anaeróbica foram simulados cinco cenários distintos de eletricidade gerada e comparados com sistema fotovoltaico, tecnologia mais adotada para MMGD na região, a partir de indicadores técnico, ambiental, social e econômico. O indicador técnico relacionou a área ocupada para produção de biomassa e para instalação dos painéis fotovoltaicos por eletricidade gerada, resultando em uma ocupação média de 8,22 ha/GWh/ano e 0,31 ha/GWh/ano, respectivamente. A redução de emissões de gases de efeito estufa foi o indicador ambiental avaliado e o resultado mostrou que sistema a biogás, utilizando o aguapé disponível na natureza, pode promover, em média, mais de 15 vezes a redução das emissões do sistema fotovoltaico durante a operação. Do ponto de vista social, o indicador analisado foi a geração de empregos por eletricidade gerada, sendo possível a criação em média de 7,64 empregos diretos/GWh a partir do sistema de biogás e de 1,34 empregos diretos/GWh nos sistemas fotovoltaicos no que tange à operação e manutenção. E em relação à viabilidade econômica, ambos os sistemas apresentaram viabilidade tendo como receita a venda da energia excedente ao SCEE e a venda de créditos de carbono. O custo nivelado de energia ficou em R\$ 0,39/GWh para o sistema fotovoltaico e R\$ 0,92/GWh para o sistema biogás.

Palavras-Chave: Geração distribuída; Biomassa de aguapé; Sistema solar fotovoltaico; Estado do Amazonas.

Abstract

The state of Amazonas has the potential to use biomass from water hyacinth for Distributed Microgeneration and Minigeneration of Electric Energy (MMGD). To evaluate the potential for using this biomass for biogas production through anaerobic biodigestion, five different electricity generated scenarios were simulated, comparing with a solar photovoltaic system, the most adopted technology for MMGD in the region, and the comparison resulted in technical, environmental, social and economic indicators. The technical indicator related the area occupied for biomass production and for the occupation of photovoltaic panels by generated electricity, resulting in an average occupation of 8.22 ha/GWh/year and 0.31 ha/GWh/year, respectively. The reduction of greenhouse gas emissions was the environmental indicator evaluated and the result showed that a biogas system, using water hyacinth available in nature, can promote, on average, more than 15 times the reduction of emissions from the photovoltaic system during operation. From a social point of view, the indicator analyzed was the generation of jobs per electricity generated, making it possible to create an average of 7.64 direct jobs/GWh from the biogas system, and 1.34 direct jobs/GWh in the systems photovoltaics in terms of operation and maintenance. And in relation to economic viability, both systems were viable with revenue from the sale of surplus energy to the SCEE and the sale of carbon credits. The levelized cost of energy was R\$0.38/GWh for the solar system and R\$0.87/GWh for the biogas system.

Keywords: Distributed generation; Water hyacinth biomass; Photovoltaic solar system; Amazonas State.

1. Introdução

A Microgeração e Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica (MMGD) e o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) começaram a ser utilizados de forma significativa a partir da publicação da Resolução Normativa nº 482, em 17 de abril de 2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), autorizando às unidades consumidoras a instalação de sistemas de geração distribuída em sua própria dependência, a injeção do consumo excedente na rede, e a adesão ao sistema de compensação de energia. Até o mês de dezembro de 2023, na região Norte do país, haviam sido registradas junto à ANEEL 146.852 usinas fotovoltaicas, 05 centrais geradoras hidrelétricas, 07 usinas termelétricas à biomassa e 04 usinas eólicas como MMGD. No estado do Amazonas, no entanto, haviam registradas 9.486 usinas fotovoltaicas e 01 usina eólica (ANEEL, 2024a).

Apesar de somente seis municípios do Amazonas estarem conectados ao Sistema Interligado Nacional de Energia (SIN) desde 2013, os demais municípios se encontram no Sistema Elétrico Isolado (SISOL), sendo atendidos na quase totalidade por usinas termelétricas à óleo diesel e gás natural. Até dezembro de 2023, havia 161 empreendimentos em operação no estado do Amazonas, onde 85,98% da capacidade fiscalizada usava fonte de origem fóssil, 13,16% de origem hídrica, 0,82% de biomassa e 0,04% de solar (ANEEL, 2024b).

Logo, percebe-se que a oportunidade de inserção de sistemas de energia renovável na rede elétrica, mesmo que para a MMGD, irá incentivar a redução do uso dos combustíveis fósseis em futuras instalações, e possivelmente nas existentes. Com isso, poderá contribuir com a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), que promovem aquecimento global e que impactam na saúde humana, especialmente pelo fato dessas usinas serem instaladas nas sedes dos municípios e próximas às comunidades.

A região amazônica brasileira tem grande potencial para o aproveitamento de biomassa para fins energéticos. As espécies aquáticas flutuantes estão em abundância em muitas regiões. Dentre elas, tem-se a popularmente conhecida aguapé, espécie com grande facilidade de reprodução e com produção perene, mostrando uma opção como fonte contínua para a produção de biogás e a geração de eletricidade. O aguapé pode ser obtido no curso dos rios (igarapés) e lagos naturais; ou cultivado em lagos artificiais, como no criadouros de peixes e no tratamento de efluentes agropecuários ou urbanos. O cultivo em lagos artificiais tem importância no tratamento de efluentes devido a sua característica de absorção de poluentes orgânicos, detergentes, fenóis e metais pesados (Pompêo, 1996). O aproveitamento energético da planta aquática pode ser solução para problemas relacionados à proliferação descontrolada da espécie e, além disso, não ocupa terras férteis que poderiam ser utilizadas para produção de alimentos.

Com relação à energia solar, sua disponibilidade para o aproveitamento na geração de eletricidade através de sistemas fotovoltaicos é significativa na região. A partir de dados do potencial solar no município de Manaus, obtidos no banco de dados METEONORM 8.1 através do software PVSyst, verificou-se que a irradiação solar média varia ao longo do ano de 4,63 a 5,31 kWh/m².dia, indicando uma média de 5,05 horas de sol pleno (HSP) por dia, pouco menor que a média nacional de 5,15 horas (Pereira *et al.*, 2017).

Projetos em MMGD usando o aguapé como fonte energética são uma opção para consumidores rurais que possuem corpos d'água em suas terras, para consumidores que atuam no tratamento de efluentes diversos, para outros consumidores que possuem área disponível e que possam cultivar essa espécie, ou para situações em que o aguapé pode ser adquirido da população local e não necessariamente ser produzido nas dependências da unidade consumidora (UC). No caso do sistema solar fotovoltaico (SFV), qualquer consumidor que tiver área disponível, seja em solo, coberturas e sobre a água (para sistemas flutuantes), poderá submeter um projeto de MMGD e ingressar no sistema de compensação de energia elétrica (SCEE).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo analisar no contexto técnico, ambiental, social e econômico o potencial de produção de eletricidade através da MMGD para

consumidores conectados à rede convencional no estado do Amazonas, com vistas a reduzir a dependência de energia elétrica e possibilitar o ingresso ao SCEE. Para tanto, se considerou a utilização do aguapé na biodigestão anaeróbica para produzir biogás e sua alimentação num grupo gerador a biogás, e comparou-se com o uso direto da fonte solar através de um sistema solar fotovoltaico. A análise foi feita através de indicadores de desempenho que envolvem a área ocupada na geração de energia elétrica (técnico), a redução das emissões de GEE (ambiental), a geração de empregos (social), o custo nivelado da energia e indicadores econômicos como valor presente líquido - VPL e taxa interna de retorno - TIR (econômico).

2. Metodologia

O estudo avaliou a obtenção da fonte de energia e os processos de conversão energética até a eletricidade gerada. Não foi abordado neste estudo a fabricação, transporte e instalação dos equipamentos e a destinação final dos resíduos e de materiais ao final da vida útil. Todas as etapas analisadas estão descritas na Figura 1.

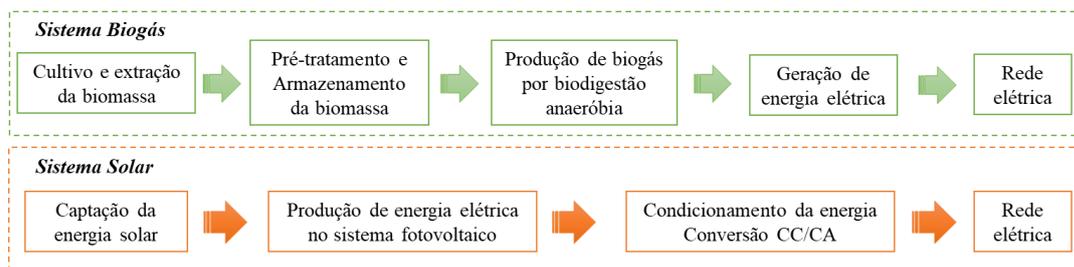


Figura 1: Fluxograma das etapas envolvidas nos sistemas avaliados.

Fonte: Elaboração própria

Baseando-se nas etapas descritas, foi realizado um dimensionamento dos sistemas para a obtenção dos indicadores. Foram traçados cinco cenários distintos de energia elétrica gerada (GWh/ano) para ambos os sistemas, buscando avaliar as diferenças entre os indicadores para cada capacidade de geração. Os critérios para a construção dos indicadores podem ser vistos nas seções a seguir.

2.1 Critérios para a avaliação técnica da geração de eletricidade pelo sistema solar fotovoltaico

Os cenários foram construídos a partir do SFV do tipo interligado à rede, o qual foi dimensionado através de simulação feita no software PVSyst[®] versão 7.4. Foram utilizados o próprio banco de dados do software relacionado aos equipamentos (painel e inversor); e o banco de dados climáticos Meteonorm 8.1 para obtenção de dados climáticos da cidade de Manaus, adotada como referência. O software forneceu um relatório em cada cenário, detalhando a

quantidade de equipamentos e respectivos dados técnicos, potência total instalada, energia gerada, perdas, energia que pode ser injetada na rede por ano e área ocupada pelos painéis. Para a determinação do indicador técnico, foi realizada a divisão da área ocupada pelos painéis (hectare) pela energia elétrica gerada (GWh).

2.2 Critérios para a avaliação técnica da geração de eletricidade pelo sistema a biogás

Em relação ao sistema a biogás, foram tomadas como referência a revisão de artigos científicos para determinação de parâmetros acerca da produção e pré-tratamento do aguapé, e da produção do biogás via biodigestão anaeróbica dessa biomassa. Foi pesquisado entre empresas nacionais, modelos de grupos geradores disponíveis no mercado para operar com biogás para referência de consumo específico. Até o presente momento, não há conhecimento sobre sistemas com esse arranjo sendo implementados na região para ser usado como referência.

2.2.1 Parâmetros gerais sobre a produção de aguapé e de biogás

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros utilizados no estudo relacionados à produção de aguapé e do biogás.

Tabela 1. Parâmetros sobre a produção do aguapé e do biogás

Parâmetros principais do aguapé	Valor	Fonte
Produção máxima - t/ha/dia	10	Pompêo (1996)
Tempo de crescimento - dias	4 a 56	Pompêo (1996)
Massa específica - kg/m ³	406	Ali <i>et al.</i> (2022)
Teor de sólidos totais - %	6,56	Wang & Calderon (2012)
Poder calorífico - MJ/kg	18,4	Davies & Mohammed (2011)
Parâmetros produtivos do biogás	Valor	Fonte
Capacidade de produção média de biogás - m ³ /kg planta	0,0223	Wang & Calderon (2012)
Poder calorífico - MJ/m ³	23,36	Wang & Calderon (2012)
TDH - dias	14-15	Wang & Calderon (2012)
Tempo operação biodigestor – dias/ano	330	Wang & Calderon (2012)

Fonte: Elaboração própria

2.2.2 Determinação da potência instalada, demanda de biogás e demanda de aguapé

A partir da geração de energia elétrica definida, foi elaborado o roteiro listado a seguir para os cálculos da área demandada.

- ✓ Estimativa da potência instalada, Eq.(1), e escolha de um modelo de grupo gerador;

$$P_{inst} = \frac{\text{Energia elétrica gerada [MWh]} \times 1000}{\text{tempo}_{operação} \left[\frac{h}{\text{ano}} \right]} = [kW] \quad (1)$$

- ✓ Cálculo da quantidade de biogás através do consumo específico do gerador, Eq. (2);

$$\text{Biogás}_{total} = \text{Consumo específico}_{gerador} \left[\frac{m^3}{h} \right] \times \text{tempo}_{operação} \left[\frac{h}{\text{ano}} \right] = [m^3 / \text{ano}] \quad (2)$$

- ✓ Cálculo da quantidade de biomassa, Eq. (3);

$$Qtde_{biomas} = \frac{Demanda\ di\acute{a}ria_{biog\acute{a}s} \left[\frac{m^3\ g\acute{a}s}{dia} \right]}{Produtividade\ di\acute{a}ria_{biog\acute{a}s} \left[\frac{m^3\ g\acute{a}s}{kg\ planta} \right]} \times dias_{operac\~{a}o} = \left[\frac{t_{biomassa}}{ano} \right] \quad (3)$$

- ✓ Cálculo da área ocupada pelo aguapé, Eq. (4).

$$\acute{A}rea\ ocupada = \frac{Qtde_{biomas}}{Produtividade\ anual_{biomas}} = [ha/ano] \quad (4)$$

O tempo de operação do grupo gerador foi considerado de 330 dias, operando por 24h/dia. Por fim, como já comentado, o indicador foi estimado a partir da relação entre a área ocupada para a produção da biomassa e a eletricidade que será injetada na rede (ha/GWh/ano).

2.2.3 Balanço energético da produção da eletricidade oriunda do aguapé

Para o cálculo do balanço energético é necessário conhecer a configuração completa do sistema. As etapas principais do processo são: (1) coleta mecanizada do aguapé, utilizando um barco, escavadeira e caminhão; (2) pré-tratamento da biomassa, com redução granulométrica utilizando triturador elétrico; (3) hidrólise, acidificação e digestão anaeróbica em reatores com alimentação contínua, agitação e aquecimento; (4) produção de eletricidade, por grupo gerador com motor de combustão interna. Em aplicações que atendem uma maior demanda de eletricidade utilizando biomassa com alto teor de sólidos totais, foi analisado o uso de sistemas contínuos através de reatores do tipo CSTR (Reator de Fluxo e Agitação Contínuos) para atingir uma melhor eficiência, conforme usado em Wang & Calderon (2012) e Alcântara *et al.* (2022).

2.3 Critérios para avaliação de impactos ambientais e sociais provenientes das tecnologias adotadas

Para a avaliação dos impactos ambientais optou-se por estabelecer o indicador ambiental relacionado à redução de emissões de GEE durante a operação das usinas. Em ambos os sistemas haverá a emissão evitada de GEE relacionada à substituição do uso da energia elétrica fornecida pela rede elétrica (a partir de combustíveis fósseis – óleo diesel e gás natural) pelo sistema de fonte renovável. No sistema fotovoltaico não há emissão de GEE no processo operacional. No caso do sistema a biogás, haveria duas situações relacionadas à obtenção da biomassa: uso da biomassa disponível na natureza e o cultivo da biomassa. Em ambos os casos se considera um balanço de emissões de gás carbônico nulo ao relacionar a emissão durante a queima do biogás e a absorção do CO₂ pela planta. Para o uso da biomassa disponível na natureza, foi considerada, como emissão evitada, a não decomposição da biomassa do aguapé, dada em 330 kgCO_{2eq}/t_{biomassa} de aguapé (Wang & Calderon, 2012); e no segundo caso não haverá emissão evitada. A Eq. (5) do *The Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*

(2006) relaciona a eletricidade gerada e o fator de emissão da rede elétrica. No SIN, a média nos últimos 10 anos do fator de emissão da margem de operação foi de 0,4217 tCO_{2eq}/MWh (MCTI, 2023); e para o SISOL, foi adotado o fator de 0,6537 tCO_{2eq}/MWh para a rede suprida por usina termelétrica a óleo diesel, e 0,555 tCO_{2eq}/MWh para rede suprida por térmicas a gás natural (EPE, 2022).

$$Emiss\tilde{a}o_{rede} = Energia\ gerada \times Fator\ de\ emiss\tilde{a}o_{rede} \quad (5)$$

As emissões de GEE efetivas no sistema a biogás seriam referentes à combustão de combustível durante a colheita da biomassa. Baseando em Scheer *et al.* (2016), foi estimado o uso de um barco e uma escavadeira, com capacidade de coleta de 115,58 t/dia, e um caminhão (capacidade de 40 t) para transportar a biomassa em uma distância máxima de 3 km. Para o cálculo das emissões ocorridas durante a combustão foi utilizada a Eq. (6), sendo o fator de emissão do óleo diesel para transporte de 75.242,70 kgCO_{2eq}/TJ (IPCC, 2006). Logo, a redução de emissões de GEE em cada sistema será a diferença entre as emissões evitadas e as emissões efetivas.

$$Emiss\tilde{a}o_{comb} = Consumo_{comb} \times Fator\ de\ emiss\tilde{a}o_{comb} \quad (6)$$

Quanto ao indicador de impacto social, adotou-se o índice de geração de emprego pela eletricidade gerada (GWh). No estudo do SEBRAE e INEDES (2020), sobre a cadeia de valores da energia solar fotovoltaica no estado do Amazonas, foi verificado que, para sistemas de MMGD, há o potencial de geração média de emprego entre 34,21 e 43 empregos por MW. O estudo levou em consideração a pesquisa realizada junto às empresas do setor no estado e englobou as etapas de elaboração do projeto e implantação do sistema e conexão à rede, contabilizando a geração de 357 empregos, dos quais 189 são efetivos e 168 de empresas terceirizadas, sem, no entanto, discriminar se a atividade é direta ou indireta (SEBRAE e INEDES, 2020). No estudo da Sociedade Alemã para Cooperação Internacional (GIZ), em 2019, foi identificado que somente 6% dos empregos em energia solar no Brasil foram direcionados à contratação exclusiva para operação e manutenção (O&M).

Para o sistema a biogás, foi apontado pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO) (2023) que na cadeia de valor da produção de biogás na região Sul do Brasil no ano de 2020 houve a produção de 303 milhões de Nm³ de biogás e 457 GWh de eletricidade a partir deste, sendo gerados 3.494 empregos diretos, 2.114 empregos indiretos e 1.653 empregos induzidos¹ pela existência das usinas a biogás nas regiões

¹ Emprego direto: atividades nos estágios da produção. Indireto: atividades em compra de insumos para outros setores e venda do biogás diretamente aos usuários. Induzido: atividades “despesas realizadas em outros setores da economia pelos agentes que receberam as receitas geradas pelos efeitos inicial e indireto” (UNIDO-GIZ, 2023)

exploradas. Foi destacado no mesmo estudo que a principal aplicação do biogás na região é para a geração de eletricidade.

2.3 Critérios para avaliação de viabilidade econômica dos sistemas analisados

A avaliação de viabilidade econômica baseou-se no fluxo de caixa dos empreendimentos, que englobou os custos com investimentos na fase inicial e reposição (CAPEX), custos operacionais (OPEX), e receita com a compensação da energia elétrica via MMGD. O investimento inicial do sistema a biogás é composto por: custo com a aquisição de máquina elétrica trituradora, custo com o sistema completo de biodigestão e custo com grupo motor gerador a biogás, subestação e conexão à rede. Os custos do sistema de biodigestão e de geração de energia elétrica foram baseados no estudo de Alcântara *et al.* (2022). Já no caso do sistema fotovoltaico, foi tomado como referência o orçamento realizado com uma empresa de Manaus no mês de janeiro de 2024 (Hardsol Energia Solar, 2024), o qual incluiu o sistema completo de geração e distribuição, ou seja, considerou os custos dos painéis, inversores, instalação elétrica e instalação física dos equipamentos, subestação e conexão à rede.

Os custos de operação e manutenção para o sistema a biogás envolveram: obtenção da biomassa, com contratação de serviço de coleta do aguapé, cujos custos foram baseados em Scheer (2016); e sistema de biodigestão, com custos baseados no estudo de Alcantara *et al.* (2022) e que englobaram, de forma geral, a compra de matérias e insumos, manutenção da infraestrutura, mão de obra e energia.

Como indicadores econômicos foram obtidos taxa interna de retorno (TIR), valor presente líquido (VPL), tempo de retorno (*payback* simples) e custo nivelado da energia (LCOE, do inglês *Levelized Cost of Energy*). Foi utilizada a ferramenta do EXCEL® para construção do fluxo de caixa e foram utilizadas as funções TIR e do VPL do programa. O *payback* simples foi calculado a partir da divisão do investimento pelo fluxo de caixa. O custo nivelado de energia foi calculado pela Eq. (8), onde VR é o valor residual dos equipamentos ao final da vida útil (VU) (EPE, 2021).

$$LCOE = \frac{\text{Custo total}_{VU}}{\text{Energia total}_{VU}} = \frac{CAPEX + OPEX + VR}{\text{Energia total}_{VU}} \quad (8)$$

Os parâmetros adotados para esta avaliação econômica são apresentados na Tabela 2. Para estimar o custo do sistema biogás, foi calculado um índice de custo anualizado do investimento por energia elétrica gerada em MWh através de dados de investimento obtidos na literatura.

A receita inicialmente avaliada no fluxo de caixa foi a venda da energia compensada via SCEE em ambos os sistemas. O cálculo realizado para a compensação de energia gerada pelos

sistemas considera uma compensação integral do consumo de energia elétrica da(s) UC(s), ou seja, o valor da energia gerada tomada como referência em cada cenário.

Tabela 2. Índices de custos de investimento, operacionais e outros

Parâmetros: cálculo do Custos com investimento	Unidade	Valor ^a	Fonte
Custo específico Sistema Solar	R\$/MWh	327,75	Investimento inicial baseado em proposta comercial Hardsol Energia Solar
Custo específico Sistema Biogás	R\$/MWh	4.195,77	Investimento baseado em Alcantara et al (2022)
Custo específico subestação (distribuição)	R\$/kVA	400,00	Investimento inicial baseado em proposta comercial Hardsol Energia Solar
Custo aquisição triturador	R\$/und	19.095,94	Ensiladeira ES-600-Trapp. Eagro Peças, custo em Manaus.
Custo dos inversores Sistema Solar	%	12,5	% relação ao investimento total (para reposição)
Parâmetros: cálculo dos custos operacionais	Unidade	Valor	Fonte
Custo contratação de serviço coleta do aguapé	R\$/ha	67.642,15	Scheer (2016)
Custo trituração/picagem da biomassa	R\$/hora	34,11	Estimado a partir do custo anual de depreciação do equipamento, juros, manutenção e mão de obra.
O&M Sistema de Biodigestão e geração de eletricidade	R\$/MWh	227,71	Valor médio praticado em Alcantara <i>et al</i> (2022)
O&M Sistema Fotovoltaico	R\$/kWp	86,98	Valor médio de EPE (2021)
Pagamento com a tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) e tarifa de energia (TE) ^b	R\$/MWh	Variável	Res. Hom. N° 3.132/2022 – ANEEL e Lei Federal 14.3000/2022
Reajuste anual da tarifa	%	4,38	Res. Hom. N° 3.132/2022 – ANEEL
Taxa de juros (SELIC) a.a.	%	11,75%	Banco Central – Jan/2024
Taxa de depreciação a.a.	%	6,67%	Res. Norm. N°674/2015 – ANEEL
Taxa mínima de atratividade (TMA) a.a.	%	12	Estimativa
Juros sobre financiamento a.a.	%	7,18	Baseado em linha de financiamento do BNDES Finem
Tempo investimento	anos	20	Estimativa a partir da vida útil da maioria dos equipamentos segundo a Res. Norm. N°674/2015 – ANEEL
Parâmetros: cálculo da receita	Unidade	Valor	Fonte
Compensação da energia elétrica	R\$/MWh	variável	Res. Hom. N° 3.132/2022 – ANEEL e Lei Federal 14.3000/2022
Preço médio do crédito de carbono	R\$/tCO _{2eq}	60	FGV, 2022
Redução de emissões Sistema biogás	tCO _{2eq} /MWh	10,04	Calculado na seção 3.2
Redução de emissões Sistema solar	tCO _{2eq} /MWh	0,54	Calculado na seção 3.2

a: Todos os custos de referência foram corrigidos através do IPCA-IBGE para o mês de janeiro de 2024. b: Custo calculado conforme estabelecido na Lei Federal 14.3000/2022 e reajustado anualmente.

Fonte: *Elaboração própria*

A tarifa utilizada para o cálculo da compensação de energia foi baseada na Lei Federal 14.300/2022 e nas tarifas aplicadas ao faturamento da energia elétrica consumida, TUSD e TE, do último ajuste tarifário da Distribuidora Amazonas Energia S/A (Resolução Homologatória n° 3.132/2022 da ANEEL). Foram consideradas variações do percentual de compensação da energia elétrica gerada. Com relação à reposição, como o tempo de vida útil dos inversores do sistema fotovoltaico é de somente 10 anos, foi programado o investimento com a troca do equipamento no ano 10.

3. Resultados e Discussão

3.1 Indicador técnico

Através do software PVSyst, foi fixada inicialmente uma potência instalada como ponto de partida para a determinação da modelagem do sistema solar. Como resultado, obteve-se as características apresentadas na Tabela 3 para cada cenário, onde a primeira linha indica o valor de energia elétrica de referência para ser injetada na rede elétrica e foi utilizado para os cálculos dos indicadores em ambos os sistemas. Foi escolhido o painel fotovoltaico de 595W_p modelo UP-M595MH da marca Upsolar. Os inversores usados na simulação foram da marca ABB, com potências distintas, cuja potência total pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3. Modelagem dos cenários para o sistema solar obtida via software PVSyst

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Eletricidade gerada - GWh/ano	0,38	0,83	1,53	3,08	4,61
Área ocupada painéis - ha	0,1189	0,2615	0,4755	0,9509	1,4264
Potência painel total - kW _p	250	550	1.000	2.000	3.000
Potência inversor Total - kW _{CA}	220	440	800	1.575	2.500

Fonte: Elaboração própria

Em relação ao sistema a biogás, foi realizado o dimensionamento acrescentando 6% (Wang & Calderon, 2012) ao valor da eletricidade gerada, usada como referência em cada cenário, para suprir a demanda dos equipamentos elétricos do sistema. Com o valor adotado, definiu-se o modelo de grupo gerador, disponível no mercado, com capacidade para atender a demanda de eletricidade em cada cenário, que pode ser vista na Tabela 4.

Tabela 4. Modelagem dos cenários para a geração de eletricidade do sistema a biogás

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Eletricidade gerada - GWh/ano	0,40	0,88	1,62	3,26	4,89
Potência a ser instalada (calculada) - kW	50,46	110,55	205,17	411,69	617,53
Potência do grupo gerador comercial - kW	58	128	250	500	750
Demanda de biogás - m ³ /ano	303.240,89	591.356,17	837.784,59	1.681.034,18	2.521.551,27
Volume biodigestor mínimo calculado - m ³	990,00	1.953,00	2.912,00	5.823,00	8.735,00
Demanda de biomassa in natura - t/ano	14.003,68	27.308,86	38.688,94	77.630,25	116.445,38

Fonte: Elaboração própria

No balanço energético, assumiu-se que todas as etapas ocorrerão dentro das dependências da UC e em locais próximos. Foi considerada a picagem, a secagem ao sol da biomassa, como etapa do pré-tratamento e armazenagem; e a utilização de aquecedor solar térmico para o aquecimento do substrato, através de serpentinas instaladas na parte interna do biodigestor (Wang & Calderon, 2012) para evitar o consumo de eletricidade e combustível. Como resultado, obteve-se o balanço energético positivo apresentado na Tabela 5.

A Tabela 6 traz os resultados do indicador técnico de área ocupada para ambos os sistemas analisados e seus respectivos cenários. O sistema solar teve valor constante entre os cenários, enquanto o sistema a biogás teve indicador foi mais elevado, confirmando haver necessidade de maior área para o cultivo do aguapé.

Tabela 5. Balanço energético da produção de eletricidade através do biogás do aguapé

Gasto energético	Cenário 1 GJ/ano	Cenário 2 GJ/ano	Cenário 3 GJ/ano	Cenário 4 GJ/ano	Cenário 5 GJ/ano
Sistema de coleta da biomassa	725,02	1.411,40	1.998,72	4.012,77	6.021,61
Pré-tratamento	86,73	173,45	260,18	433,63	607,09
Sistema de Biodigestão	14,37	42,73	85,15	212,51	382,07
Energia Demandada Total	826,12	1.627,59	2.344,06	4.658,91	7.010,77
Eletricidade produzida	1.438,63	3.152,02	5.849,93	11.738,02	17.607,02
Balanço energético	612,51	1.524,43	3.505,87	7.079,10	10.596,25

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6. Indicador área ocupada por energia elétrica gerada

Área ocupada/eletricidade gerada	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Indicador solar - ha/GWh/ano	0,3154	0,3166	0,3102	0,3091	0,3091
Indicador biogás - ha/GWh/ano	10,18	9,06	6,91	6,91	6,91

Fonte: Elaboração própria

No entanto, o aumento da eficiência na conversão de energia² promove uma redução do indicador com o aumento da escala do sistema a biogás. Deve-se considerar que a área ocupada pelo cultivo da biomassa ocorrerá num corpo d'água e que o aguapé, sendo cultivado de forma controlada, pode fornecer muitos benefícios, especialmente se cultivado em lagos de efluentes.

3.2 Indicador de impacto ambiental

A partir dos cálculos de emissões evitadas e emissões efetivas foi obtida a redução de emissões de CO_{2eq} referentes ao uso de cada sistema, e calculado o indicador de redução de emissões por energia elétrica gerada para sistemas inseridos no SIN e no SISOL (com usinas a óleo diesel - OD e a gás natural - GN), apresentados na Tabela 7 (como média dos cenários).

Tabela 7. Indicador de Redução de emissões durante a operação

Índice de Redução de Emissões	Sistema Solar	Sistema a Biogás - Biomassa natural	Sistema a Biogás - Biomassa cultivada
Redução de emissões SIN - tCO _{2eq} /ano/GWh	421,76	7.278,19	308,22
Redução de emissões SISOL-OD - tCO _{2eq} /ano/GWh	653,71	9.890,30	540,16
Redução de emissões SISOL-GN - tCO _{2eq} /ano/GWh	555,49	9.792,08	441,94

Fonte: Elaboração própria

A redução de emissões foi verificada em todos os cenários, sendo o sistema a biogás a alternativa com melhor perspectiva de contribuição quando o aguapé aproveitado for natural do corpo d'água analisado. No uso do aguapé cultivado, a redução de emissões representou quase 5% das emissões evitadas com uso da biomassa natural, enquanto a redução do sistema solar representou 6% dessas mesmas emissões evitadas.

3.3 Indicador de impacto social

² Observou-se que o grupo gerador de 250 kW apresenta maior eficiência operacional, se comparado aos outros de menor capacidade. Com maior eficiência, demandará menor quantidade de gás por energia gerada se comparado aos outros dois equipamentos e, conseqüentemente, demandará menor quantidade de biomassa e área ocupada.

A determinação do indicador de geração de emprego por eletricidade levou em conta a geração de empregos total e direta, relacionados às fases de instalação e de O&M. Para o sistema solar, o emprego direto foi de 6% dos empregos do setor O&M de um sistema solar após instalado (GIZ, 2019). Logo, o indicador de geração de emprego total ficou na ordem de 22,31 empregos/GWh³ e o indicador de emprego direto para O&M foi de 1,34 empregos/GWh. Para o sistema a biogás, o indicador calculado foi de 15,87 empregos totais/GWh e 7,64 empregos diretos/GWh. O resultado da possibilidade de geração de empregos em cada cenário pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8. Geração de emprego em cada cenário abordado

Geração de emprego nos cenários	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
TOTAL DE EMPREGOS					
Sistema Solar	8,41	18,43	34,20	68,63	102,94
Sistema a biogás	5,98	13,11	24,33	48,82	73,24
EMPREGOS DIRETOS E NA O&M					
Sistema Solar	0,50	1,11	2,05	4,12	6,18
Sistema a biogás	2,88	6,31	11,71	23,49	35,24

Fonte: Elaboração própria

A geração de emprego total do sistema solar para a cadeia de MMGD tem maior índice, podendo ser justificada pela grande quantidade de equipamentos e estruturas instalados. Por outro lado, o indicador cai quando resulta na geração de emprego somente para a O&M, devido à simplicidade operacional do sistema e à baixa necessidade de manutenção. O sistema a biogás possui um indicador quase cinco vezes maior do que do sistema solar quando se trata do emprego em O&M.

3.4 Indicadores de viabilidade econômica

A Tabela 9 apresenta o resultado com os indicadores analisados. Foi considerada a compensação de 100% da energia elétrica gerada. Observa-se que na situação 1, sem a venda de crédito de carbono, o sistema a biogás não apresentou competitividade com o sistema solar; e avaliando percentuais abaixo de 100% de energia elétrica gerada sendo compensada, os sistemas apresentaram VPL e TIR abaixo do esperado. Na situação 2, com a venda de créditos de carbono possíveis de serem obtidos com a redução de emissões de CO_{2eq} (seção 3.2), os sistemas apresentaram indicadores financeiros favoráveis, demonstrando haver competitividade entre eles. Ainda foram simulados valores abaixo de R\$60/tCO_{2eq} (FGV, 2022), e observou-se que a partir de R\$36,00/tCO_{2eq}, os indicadores se mostraram positivos.

³ O índice do sistema solar foi convertido para emprego/GWh, pois os dados apresentados no documento do SEBRAE e INEDES (2020) estavam com a unidade emprego/MWp. Em simulação feita pelo PVSyst um sistema solar com 1 MWp instalado consegue gerar para região de Manaus 1,53GWh de eletricidade por ano.

Tabela 9. Resultado indicadores financeiros

		Situação 1: Cálculo sem venda de crédito de carbono				
Indicadores financeiros		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Sistema Biogás	VPL	-R\$ 761.638,05	-R\$ 1.082.552,33	-R\$ 1.002.852,47	-R\$ 1.752.480,77	-R\$ 2.454.915,15
	TIR	0%	6%	9%	9%	9%
	PayBack	20,84	16,93	15,18	14,89	14,75
Sistema solar	VPL	R\$ 18.657,56	R\$ 67.823,89	R\$ 153.007,81	R\$ 306.399,46	R\$ 497.569,78
	TIR	12%	13%	13%	13%	13%
	PayBack	12,1	12,0	11,8	11,8	11,8
		Situação 2: Cálculo com venda de crédito de carbono a R\$60/tCO _{2eq}				
Indicadores financeiros		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Sistema Biogás	VPL	R\$ 521.456,11	R\$ 1.728.683,15	R\$ 4.214.609,99	R\$ 8.716.478,47	R\$ 13.248.523,71
	TIR	21,47%	24,65%	30,02%	30,75%	31,06%
	PayBack	9,81	7,93	5,11	4,96	4,86
Sistema solar	VPL	R\$ 91.883,79	R\$ 228.261,20	R\$ 450.768,59	R\$ 903.863,37	R\$ 1.393.765,63
	TIR	14,48%	14,85%	15,12%	15,13%	15,23%
	PayBack	11,1	10,8	10,7	10,7	10,7

Fonte: Elaboração própria

Em relação ao LCOE, para o sistema solar foi obtido um valor médio de R\$ 390/MWh, e para o sistema biogás de R\$ 923/MWh entre os cinco cenários avaliados, demonstrando que o sistema solar é mais atrativo e inclusive seu custo é menor do que a tarifa cobrada pelo consumo de energia elétrica⁴.

4. Conclusões

Este estudo foi desenvolvido a partir da percepção da necessidade de exploração de tecnologias que utilizam fontes renováveis alternativas e, em especial, que possam explorar a energia disponível em biomassa com foco na geração de eletricidade para a região Amazônica. As tecnologias que fazem o uso dessa biomassa não são sofisticadas e podem promover a participação da população local, seja produzindo a biomassa, ou operando os sistemas que não exija especialização, o que incentiva a geração de renda e emprego local.

A adoção de projetos em MMGD permite que tecnologias de energia renovável possam ser exploradas por UCs para ingressar no SCEE. Através da simulação de cenários distintos de geração de energia elétrica e da determinação de indicadores nos contextos técnico e socioambiental foi possível explorar as possibilidades das rotas analisadas. O indicador técnico permitiu visualizar a demanda de área pelas duas tecnologias e, no caso do aproveitamento do aguapé, apesar de demandar uma área maior do que o sistema solar, ela ocorre no corpo d'água. Além disso, o aproveitamento do aguapé apresentou balanço energético positivo, usando um sistema com baixa demanda energética. Vale ressaltar que ambos os sistemas são comparáveis, na configuração adotada, para a compensação de energia via MMGD, no entanto, para o suprimento a um local não atendido pela rede convencional, o sistema solar só teria aplicação

comparável ao sistema a biogás agregando a ele um sistema de armazenamento de energia via baterias, por exemplo, ou instalando um sistema híbrido com outra tecnologia que permita o fornecimento de energia ininterrupto.

Observou-se pelas estimativas que ambos os sistemas têm potencial significativo para redução das emissões de CO_{2eq} com possibilidade de venda de créditos de carbono. O maior potencial está na emissão evitada da decomposição da biomassa quando se aproveitar o aguapé originário do corpo d'água. No que tange à emissão evitada do consumo de eletricidade da rede elétrica, há maior perspectiva de redução de emissão na rede do SISOL alimentada com óleo diesel, que corresponde a maioria da capacidade instalada nos sistemas isolados da região.

No aspecto social, relacionado à geração de emprego, há competição entre os sistemas, com algumas diferenças significativas, onde o sistema solar emprega mais mão-de-obra durante o processo de instalação dos equipamentos; enquanto durante a operação, o sistema a biogás tem maior empregabilidade. No que tange ao aspecto econômico, é necessário avaliar formas de incentivos econômicos para tornar os sistemas competitivos. A venda de crédito de carbono exemplificada tem potencial de incrementar a receita, no entanto, há outros incentivos que podem ser utilizados, como os fiscais e financeiros, aplicáveis às tecnologias propostas, estipulados pela Política Estadual de Incentivo ao Aproveitamento de Fontes Renováveis de Energia e Eficiência Energética, para o estado do Amazonas (Lei nº 5.350/2020), e pela Política Estadual de Incentivo ao Uso de Biomassa para a Geração de Energia (Lei nº 6.598/2023).

6. Referências

Alcântara, L.P. Zang, J.W. Fonseca-Zang, W. A. R. A viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás. **Eletr. Cient. Inov. Tecnol**, Medianeira, v. 13, n. 32, p. 1-50, 2022.

Ali, S. S. Elsamahy, T. Abdelfattah, A. et al. Exploring the potential of anaerobic co-digestion of water hyacinth and cattle dung for enhanced biomethanation and techno-economic feasibility. **Fuel**, v. 329, p. 125397, 2022.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Homologatória nº 3.132 de 01 de novembro de 2022**. Brasília, 2022. Disponível em: <www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20223132ti.pdf>. Acesso em 26 jan 2024.

ANEEL (2024a). **Relação de empreendimentos de Geração Distribuída**. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida>>. Acesso em 05 jan 2024.

ANEEL (2024b). Sistema de Informação de Geração da ANEEL. **Capacidade instalada no Amazonas**. Brasília, 2024. Disponível: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>>. Acesso em 05 jan 2024.

Davies, R.M.; Mohammed, U.S. Moisture-dependent Engineering Properties of Water Hyacinth Parts. **Singapore Journal of Scientific Research**, v.1, p. 253-263, 2011.

EPE. Empresa de pesquisa energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME/EPE, 2020.

FGV. Fundação Getúlio Vargas. **Mercado de carbono voluntário no Brasil**. Disponível em: <https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/ocbio_mercado_de_carbono_1.pdf>. Acesso em 25 fev 2023.

GIZ. A mão de obra na cadeia produtiva do setor solar brasileiro. Brasil: 2021. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/12/Estudo-Cadeia-Produtiva-Solar.pdf>>. Acesso em 15 ago 2023.

Hardsol Energia Solar. **Proposta comercial para gerador de 250kW e 3MW**. Manaus, 2024.

IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, v. 2 – Energy. IPCC: 2006. Disponível no site: <<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>>. Acesso em 04 ago 2023.

MCTI. Ministério de Ciências, Tecnologia e Informação. **Fatores de emissão MDL/SIN**. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>. Acesso em 10 ago 2023

Pereira, E. B. Martins, F. R. Gonçalves, A. R. et al.. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p.

Pompêo, M.L.M. Culturas hidropônicas, uma alternativa não uma solução. **Anais Seminário Regional de Ecologia**. São Carlos, SP, Brasil, 1996, p. 73-80. Disponível em: <http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29&>. Acesso em 28 abr 2023.

Priya, P. Nikhitha, S.O. Anand, C. et al. Biomethanation of water hyacinth biomass, **Bioresource Technology**, v. 255, p. 288-292, 2018.

PVSyst. Sobre o Software PVSyst. Home. Suíça, 2023. Disponível no site: <<https://www.pvsyst.com/>>. Acesso em 28 ago 2023.

SEBRAE. **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Amazonas e INEDES**. Instituto Energia e Desenvolvimento Sustentável. Cadeia de valor de energia solar fotovoltaica no Estado do Amazonas. Amazonas: 2020.

Scheer, M.B. et al. Rendimentos operacionais de barco removedor e escavadeira de braço longo no controle de infestações de plantas aquáticas no reservatório Piraquara II. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 21, n.2, p. 328-337, 2016.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. **Tool to calculate the emission factor for na electricity system**. Version 07.0. 2017. Disponível no site: <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-07-v7.0.pdf>>. Acesso em 15 dez 2023.

UNIDO. Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. **Geração de emprego direto, indireto e induzido na cadeia do biogás: determinação do impacto total no emprego da cadeia de valor do biogás na Região Sul do Brasil** / Centro Internacional de Energias Renováveis. – Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2023. 85 p.

Wang, Z.; Calderon, M. M. Environmental and economic analysis of application of water hyacinth for eutrophic water treatment coupled with biogas production, **Journal of Environmental Management**, v.110, p. 246-253, 2012.



UTILIZAÇÃO DE BIOMASSA PARA GERAÇÃO SUSTENTÁVEL DE ENERGIA EM COMUNIDADES ISOLADAS DA AMAZÔNIA

BIOMASS UTILIZATION FOR SUSTAINABLE ENERGY GENERATION IN ISOLATED AMAZONIAN COMMUNITIES

Fábio Cordeiro de Lisboa^{1*}, Carlos Alberto Gurgel Veras¹, Augusto César de Mendonça
Brasil¹

¹ Universidade de Brasília – UnB, FCTE, Brasília DF, * E-mail: fabiolisboa@unb.br

Resumo

Este artigo investiga o potencial de três fontes de biomassa amazônica - *Theobroma grandiflorum*, *Astrocaryum aculeatum* e *Acrocomia aculeata* - como soluções para a produção de eletricidade em comunidades isoladas na floresta amazônica brasileira. Essas comunidades enfrentam desafios devido aos altos preços do diesel e à disponibilidade limitada de combustível. O estudo propõe um processo de conversão de energia em duas etapas adaptado para aplicações de calor e energia combinados (CHP). Envolve a carbonização da biomassa seguida pela gasificação do carvão para produzir gás de baixo teor de alcatrão, que é utilizado em um motor bicomcombustível com óleo vegetal puro para ignição piloto. A pesquisa enfatiza a caracterização metódica da matéria-prima, examinando as propriedades físicas e químicas da biomassa e seus derivados adquiridos por métodos de conversão térmica. Protocolos padronizados garantem precisão e confiabilidade, incluindo preparação de amostras seguindo diretrizes ASTM, análise imediata de amostras e modelagem de gaseificação. Modelos de equilíbrio preveem concentrações de produtos de gaseificação, facilitando o projeto do sistema. O sistema integrado proposto demonstra uma eficiência geral de 40,3%, potencialmente gerando 1.220 MWh de eletricidade limpa anualmente e mitigando aproximadamente 680 toneladas métricas de emissões de CO₂ por ano. Essa abordagem de resíduos para energia promete melhorar a qualidade de vida das comunidades locais ao impulsionar a produção de eletricidade e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. A caracterização da matéria-prima e a análise do processo desempenham um papel crucial na utilização de biomassa para geração de energia, oferecendo insights vitais para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-Chave: Comunidades isoladas. fontes de biomassa. produção de eletricidade.

Abstract

This paper investigates the potential of three Amazonian biomass sources - *Theobroma grandiflorum*, *Astrocaryum aculeatum*, and *Acrocomia aculeata* - as solutions for electricity production in isolated communities within the Brazilian rainforest. These communities face challenges due to high diesel prices and limited fuel availability. The study proposes a two-step energy conversion process tailored for combined heat and power (CHP) applications. It involves biomass carbonization followed by charcoal gasification to produce low-tar producer gas, which is used in a dual-fuel engine with straight vegetable oil for pilot ignition. The research emphasizes meticulous feedstock characterization, examining the physical and

chemical properties of biomass and its derivatives through thermal conversion methods. Standardized protocols ensure accuracy and reliability, including sample preparation following ASTM guidelines, proximate analysis according to NBR standards, and elemental analysis for comprehensive insights. Specialized equipment aids immediate feedstock analysis, while gas chromatography-mass spectrometry offers chemical composition insights of bio-oil. Gasification modeling evaluates biomass conversion performance, aiding in optimization. Equilibrium models predict gasification product concentrations, facilitating system design. The proposed integrated system demonstrates a 40.3% overall efficiency, potentially generating 1,220 MWh of clean electricity annually and mitigating approximately 680 metric tons of CO₂ emissions yearly. This waste-to-energy approach holds promise in enhancing local community quality of life by boosting electricity production and reducing fossil fuel reliance. Feedstock characterization and process analysis play a crucial role in biomass utilization for energy generation, offering vital insights for sustainable development.

Keywords: Isolated communities. biomass sources. electricity production.

1. Introduction

The national electric power distribution network reveals an insufficient supply of electricity to Brazil's northwest region, primarily dominated by the Brazilian rainforest, accounting for about half of the nation's territory (ONS, 2017). In the Amazon region, thermoelectric generators burning diesel oil realize most of the off-grid electrification of the municipalities, referred to as the isolated distribution network system (Van Els; De Souza Vianna; Brasil Jr, 2012). In remote communities, diesel generators work for a short period of the night, producing limited power, mostly for lighting and television sets because of the high oil price and the shortage of nearby fuel retailers. Besides electricity generation, diesel engines also propel ships and small boats that comprise the large part of the region's primary transportation system. For these communities, increased electrification should help implement productive activities, which would improve income generation and their quality of living (Narula; Bhattacharyya, 2017).

In a report for the Brazilian Ministry of Mines and Energy, Di Lascio e Fagundes Barreto, (2009) presented an economic and technological assessment on renewable energy sources for off-grid electrification of remote communities in the Amazon region. The authors recommended actions towards more intensive use of biomass in combination with solar and hydro, in standalone or combined systems. The rainforest has large biomass resources that can be converted into heat, biofuels, and electricity. In supplying the latter, it is fundamental to consider the widespread diesel generator set across the region. Apart from pure hydrocarbons, diesel engines can also operate in dual mode (Aklouche et al., 2018). The power plant could run with fuel gas from bio-based feedstock gasification and straight vegetable oil (Corsini et al., 2015).

For remote areas, electrification can be materialized through hybrid energy systems. In hybrid mini-grid systems, diesel engine generator sets play an important role either for backup or peak load applications. In dual-fuel operation, diesel engine cycles can also provide baseload power when integrated into a small biomass gasification plant. Through partial or total substitution of fossil fuel, remote communities could increase the share of local renewable resources for power generation. The Energy and Environment Laboratory at the University of Brasilia has considerable experience in the dual-fuel operation mode of compression ignition engines burning straight vegetable oils and producer gas from downdraft gasification of biomass (Rodrigues *et al.*, 2009). In this configuration, gas cleaning has always been challenging to manage. The plant has also been a concerning source of secondary waste, mostly condensed tar.

In biomass gasification, low-tar producer gas can be obtained when pyrolysis and char reduction occur in specific locations inside the reactor separated by a high-temperature pyrolysis gas combustion zone. Such configuration is referred to as staged gasification. Instances are the two-stage downdraft Viking, and the three-stage fluidized bed FLETGAS gasification system. The technologies, however, are not affordable and mature to work in remote areas of the Amazon. Besides, the gasifiers require skilled operators, and the overall cost prevents broad-scale implementation (Brandt; Larsen; Henriksen, 2000; Gómez-Barea; Leckner, 2010; Henriksen *et al.*, 2006).

We propose a different strategy for staged gasification and power generation (Miranda; Veras; Ghesti, 2020). Conceptually, pyrolysis and gasification would occur in different specialized reactors rather than in one piece of standalone equipment. Charcoal from biomass should be produced in a carbonization reactor, optimized for high char yields (Idris *et al.*, 2015). Then, the charcoal from the carbonization plant would feed a gasifier integrated into an internal combustion engine for power generation. By such means, the producer gas would have inexpressive tar content, virtually eliminating the complex process of gas cleaning and the generation of secondary waste. The diesel generator would operate in dual-fuel technology, burning producer gas from charcoal gasification combined with a small amount of diesel or diesel-like fuel to provide the pilot ignition of the air-gas mixture. The proposed technology can be straightforwardly materialized by cost-effective off-the-shelf hardware.

The aim of this study was then to investigate the potential of three biomasses from the western Amazon region of Brazil for CHP (Combined Heat and Power) application: endocarp of the "macaúba" palm fruit (*Acrocomia aculeata*), the endocarp of the "tucumã" palm fruit

(*Astrocaryum aculeatum*), and the epicarp of the fruit of the "cupuaçu" tree (*Theobroma grandiflorum*). A survey in the literature indicated an absence of previous research on the utilization of these biomasses for heat and power generation, particularly their charcoals. The proposed system configuration also circumvents the seasonality of the fruits by storing only energy-densified charcoals. Biological decay of the biomasses is also prevented through carbonization.

Throughout the text, the biomasses *Astrocaryum aculeatum* (Costa et al., 2016; Lira et al., 2013b), *Acrocomia aculeata* (Ciconini et al., 2013; Motta et al., 2002), and *Theobroma grandiflorum* (Cerón; Higuíta; Cardona, 2015; Müller et al., 1995) are referred to by their local names, i.e., tucumã, macaúba, and cupuaçu, respectively. The parent feedstocks were characterized by calorific value and by proximate and ultimate analysis. Thermogravimetric analysis was conducted to infer the feedstocks' thermal conversion dynamics. The results help in planning the carbonization experiments in an externally heated batch reactor. The biomasses were subjected to slow thermal degradation for charcoal, bio-oil, and non-condensable gases yield determination. The charcoal and bio-oil produced were also characterized as value-added by-products for energy applications. Additionally, a preliminary energy analysis was performed for the proposed thermal conversion pathway. In a broader sense, the research was conducted in two phases: characterization and fundamental performance analysis of the biomasses and their charcoal for energy application (this work), and performance analysis of the derived charcoal gasification in a small fluidized-bed reactor to be presented in a forthcoming paper (Lira *et al.*, 2013a).

2. Material and Methods

2.1 Feedstock Characterization

The physical and chemical properties of the parent biomass and its thermal conversion by-products were characterized using specific analyses in dedicated devices, adhering to rigorous testing methods. For sample preparation, 20 g of biomass per sample were prepared according to ASTM E 1757-01 "Method A". Initially, the samples were spread on a metal tray to dry at room temperature, then placed in a Marconi MA035 oven for at least 12 hours. The dried samples were cooled in a desiccator and weighed to determine water content. The biomass and charcoal characterization, referred to as feedstock, followed the same drying and preparation procedures. After cooling, samples were crushed in an Ika Werke model M20 crusher and classified by particle size using ASTM 60 (250 mm opening) and ASTM 100 (0.150 mm opening) sieves, which were sieved for 15 ± 1 minutes in a Bectel shaker. The material

from the sieving was then used for proximate analysis (volatile and fixed carbon), while fine particles collected at the bottom were reserved for ash analysis. The proximate chemical analysis of feedstock, standardized by NBR 8112/1986, included moisture, ash, volatile, and fixed carbon contents, relevant to biofuel classification for energy conversion. All analyses were conducted in triplicate, with results averaged. For immediate feedstock analysis, two Quimis Q318A24 furnaces, a precision scale BEL AS200, and desiccants were used. Carbon moisture analysis, performed according to NBR 8112 and E871 standards in triplicate, involved drying approximately one gram of crushed samples (ASTM 60 sieve) at 105°C for five hours. After cooling, the samples were stored in a desiccator for further analysis. Water content was estimated according to Eq.1

$$w = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

where m_i and m_f are the initial and final mass of the sample, respectively.

The volatile content estimate was performed according to NBR 8112 and E872 on a triplicate and dry basis. For this analysis, we used three crucibles with lid. The furnace was heated to 900 °C, and biomass samples of $1.0 \text{ g} \pm 0.0003 \text{ g}$ were used for the characterization. When the furnace temperature reached 900 °C, the samples were moved to the vessel opening, kept there for three minutes, followed by seven minutes inside the closed vessel. Then, the crucibles were placed in a desiccator to complete the cooling process. Volatile matter content of the sample (biomass or charcoal), expressed on a dry basis (%_{db}), was determined according to the equation

$$VMC = \left(\frac{m_{i,s} - m_{f,s}}{m_{i,s}} \right) \times 100 \quad (2)$$

where $m_{i,s}$ (g) is the initial mass of the sample taken for test and crucible and $m_{f,s}$ (g) is the mass of charcoal and crucible.

The ash content was performed according to NBR 8112 and D1102 norms, in triplicate and dry basis. For this analysis, we used crucibles previously calcined. The furnace was heated to 700 °C maintained at that temperature for five hours, with $1.0 \pm 0.003 \text{ g}$ of the sample under analysis. After that, the crucibles were placed in a desiccator for cooling. The ash content in the sample (biomass or charcoal) expressed on a dry basis (%_{db}) was determined from the equation

$$AC = \frac{m_{ash} + m_c}{m_{i,s} + m_c} \times 100 \quad (3)$$

where m_{ash} (g) is the mass of the sample, m_c (g) is the mass of the crucible, and $m_{i,s}$ (g) is the initial mass of the sample under analysis.

Fixed carbon (%_{db}), on a dry basis, was calculated by difference following

$$FC = 100 - (VMC + AC) \quad (4)$$

Elemental analysis was carried out to infer carbon (C), oxygen (O), nitrogen (N), and hydrogen (H) content in the biomass and charcoal. These elements were determined by a Perkin Elmer 2400 Series II CHN Elemental Analysis equipment. The NBR / NM 52: 2009 norm was used for the determination of the bulk density, using a cube-shaped container with a volume of 1.0 cm³. Each sample was crushed and classified using ASTM 60 sieves and kiln-dried for 24 hours at 103±2 °C. A desiccator was used for the cooling of the samples after the drying. The samples were loosely placed in a container and then weighed in triplicate. The density was calculated with the following equation

$$\rho = m_s/V_c \quad (5)$$

where m_s (g) is the mass of the sample and V_c (cm³) is the volume of the container.

The specific surface area (BET) and pore size were measured using an accelerated surface area and a porosimeter system ASAP 2020, Micromeritics (Norcross, GA). Charcoal samples were classified and 0.5 g placed in each container for further analysis. Degasification was performed for four hours, allowing the determination of the micropore and mesopore distribution in the sample.

Feedstocks higher heating values (HHV) were determined according to the NBR 8633/1984 standard test norm. Samples of biomass or charcoal were placed in aluminum dishes and dried inside a furnace at 103 ± 2°C until a constant mass was achieved. After drying, the hot samples were placed in a desiccator for cooling. Three compressed samples, weighing approximately 0.45 g were used in a Parr 6400 calorimeter for analysis. The following equation was used to infer the low heating value from the measured higher heating value and the hydrogen (HC) and moisture (MC) contents in feedstock

$$LHV = HHV - 0.0245MC - 0.212HC \quad (6)$$

The carbonization of biomass, a complex process generating charcoal, pyrolygous liquor (bio-oil), and light gases, typically results in approximately 35% charcoal, 35% liquid, and 30% non-condensable gases under an external heat source in the absence of oxygen (Bridgewater, 2004). To evaluate the potential of parent biomasses for energy applications, a basic characterization of the slow pyrolysis bio-oils was conducted using thermal analysis and

6

gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS). This analysis was performed on a Thermo Scientific Dionex UltiMate 3000 analyzer, following the methodology described by Fortes & Baugh, (2004). Preliminary thermal decomposition experiments were conducted in a TG-FTIR system before the main carbonization experiments in a small batch reactor. The TG-FTIR system, comprising a SCIENTIFIC TGA reactor coupled with an FTIR unit via the THERMO interface, enabled monitoring of pyrolytic gas evolution. The gas passed through a heated transfer line to the TGA interface flow cell IR for IR spectrum analysis, with results stored for further access. The gas line, measuring 100 mm in length with a 23 ml internal volume and KBr windows, was connected to the TG furnace tube, facilitating the passage of inert gases into the gas cell. Approximately 10 mg of finely crushed and screened biomass samples were placed in a platinum crucible and heated at a rate of $2\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ up to $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ under a nitrogen flow of 100 ml min^{-1} , with a holding time of 120 minutes at the maximum temperature. The gas cells and transfer line were maintained at $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $190\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. Based on the differential thermogravimetric (DTG) curves, parameters for the carbonization experiments in the batch reactor were defined, including heating rate, temperature range, and holding time. The carbonization strategy for the biomasses, ensuring that over 90% of char formation occurs between 200 and $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, is summarized in Table 1.

Table 1. Basic parameters for pyrolysis experiments

Biomass	Cellulose peak in DTG ($^{\circ}\text{C}$)	Heating rate ($^{\circ}\text{C min}^{-1}$)	Temperature range (ΔT) ($^{\circ}\text{C}$)	Time in ΔT (min)
Tucumã	328	2.0	330-430	420
Macaúba	325	2.0	330-430	420
Cupuaçu	288	2.0	290-360	420

Source: the author (2020)

The temperature range in Table 1 was defined as the minimum and maximum temperatures for the sample's thermal degradation in a prescribed time. The minimum pyrolysis temperature refers to the end of cellulose degradation. Higher temperatures and process time would enhance lignin degradation, thus reducing charcoal yields. Then, a reaction time at the prescribed temperature range was established for each sample.

2.2 Sample preparation and carbonization

An electric kiln manufactured by SLFI was used for carbonization experiments in a controlled temperature environment (Fig. 1). The kiln had an internal cylindrical container measuring 19 cm in diameter and 35 cm in length with thermocouples inserted at the reactor's center and wall. A minimum of 360 g of each biomass was thermally degraded. The

thermocouple inserted at the vessel's external wall was used to control the maximum temperature the samples would be subjected to. In the reactor, heat propagates from the outer layers to the center (cylindrical coordinates) of the samples. Consequently, the pyrolysis front travels radially from the wall to the center of the reactor, making the thermal degradation slightly non-isothermal. During the entire process, a software named Pyrolysis 10L was responsible for monitoring and controlling the heat input and retrieving data for further investigation. Volatile gases were condensed, and the pyroligneous liquor was collected and measured for subsequent yield and chemical analysis.

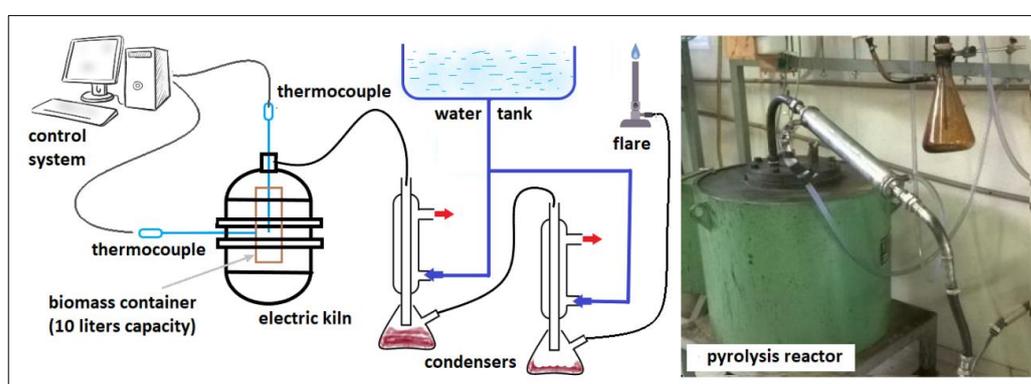


Figure 1. Layout of the carbonization plant and a picture of the pyrolysis batch reactor.

Source: the authors (2024)

For carbonization performance analysis, solid material (charcoal) and condensed liquid (tar) were weighed on a Mars A5000 scale. Solid and bio-oil yields were calculated by the ratio between the respective mass of solid and liquid, and the mass of dry biomass placed into the reactor. Through mass difference, it was possible to infer the yield of non-condensable gases.

2.3 Gasification model

Energy analysis of the integrated gasification dual-fuel engine cycle was performed using models developed by our research group, which rely on a non-stoichiometric thermochemical equilibrium model to evaluate gasification performance. The combined heat and power (CHP) plant analysis was based on energy conservation principles, with process efficiencies determined experimentally by our research team. These models serve as low-cost tools for preliminary performance analysis of CHP systems, allowing the comparison of various gasification parameters, such as feedstock composition and reaction temperature, regardless of gasifier type. While equilibrium models typically predict H₂, CO, and CO₂ concentrations with deviations within 5% (vol.) from experimental values (Safarian; Unnþórsson; Richter, 2019), methane formation in syngas often requires constraints, as simple equilibrium models tend to

underestimate it (Mendiburu; Carvalho; Coronado, 2014). Gasification performance estimates were conducted for parent biomasses and their charcoals, using a reference mass flow rate of 10 kg/h per feedstock (daf). The thermal equilibrium model minimizes the Gibbs free energy of the gasification products, constrained by an element mass balance using Lagrange multipliers. Figure 2 illustrates the code's solution diagram window, developed on the Engineering Equation Solver platform. The code allows pre-setting of carbon conversion efficiency and tar concentration in syngas based on gasifier type, including provisions for regenerative heat transfer for gasification agent preheating and reactor insulation performance. It can also be applied to a lab-scale reactor by setting external heating power, with predictions made by solving the First Law of Thermodynamics or by specifying process temperature at a given pressure. Key input data include feedstock immediate and elemental analysis, system equivalence ratio, and pressure, with the gasification agent comprising a mixture of oxygen, nitrogen, steam, and carbon dioxide at specified concentrations. The feedstock's high heating value can be prescribed or estimated from its elemental composition, and methane concentration in syngas is prescribed using a correlation from (Mendiburu; Carvalho; Coronado, 2014). The code optimizes gasification performance parameters by varying two independent variables using either a conjugate directions method or a variable metric method, with variable thermodynamic properties calculated using NASA polynomials.

3. Results and Discussion

In biomass thermal degradation, several factors influence product yield and properties, including the type of feedstock, reaction atmosphere, temperature, pressure, presence of minerals, particle size, and heating rate (Kan; Strezov; Evans, 2016). Table 2 presents the main characteristics of the parent feedstock and by-products after slow thermal degradation in a batch reactor. The uncertainties in Table 2 are derived from the standard deviation of the mean from three experiments. Generally, the biomasses exhibited similar characteristics in terms of composition and elemental constitution, with fixed carbon and volatile matter ranging from 18-23% and 66-70%, respectively. Ash and moisture contents ranged from 1.5-2.8% and 9-10.2%. The elemental composition of the biomass included 46-56% carbon, 5.9-7.9% hydrogen, and 4.3-9.5% oxygen, with higher heating values (daf) between 19 and 25 MJ/kg. Temperature profiles at the reactor's center and wall indicated the duration the samples were maintained within the specified temperature ranges listed in Table 1. The overall heating rate of the samples was 1.7 °C/min, increasing from 25 to 340 °C, over approximately 190 minutes. Following this steady temperature rise, the samples experienced a prolonged heating phase at an average rate

of 0.25 °C/min, reaching maximum temperatures of about 360 °C for cupuaçu and 420 °C for macaúba and tucumã. Specifically, tucumã samples were thermally degraded within the 330-415 °C range for approximately 290 minutes, followed by a 110-minute conversion period at 420 °C.

Table 2. Main characteristics of the parent feedstocks and the derived charcoals

Analysis	Tucumã	Macaúba	Cupuaçu
Proximate analysis of biomass (dry wt%)			
Fixed carbon	20.56±0.15	22.45±0.13	18.06±0.11
Volatile	66.54±0.12	66.69±0.09	70.01±0.10
Ash	2.78±0.01	1.54±0.01	2.80±0.02
Moisture	10.12±0.19	9.32±0.22	9.13±0.18
Ultimate analysis (dry wt%) - biomass as received			
Carbon	56.13±0.01	49.43±0.02	46.13±0.01
Hydrogen	7.85±0.02	6.27±0.01	5.94±0.01
Oxygen	35.01±0.01	42.15±0.02	47.07±0.02
Specific properties - biomass			
Chemical formula	CH1.70O0.47N0.01	CH1.50O0.64N0.04	CH1.50O0.77N0.02
HHV (MJ/kg)	24.26±0.02	21.32±0.01	19.27±0.02
LHV (MJ/kg)	20.31±0.02	20.72±0.01	18.80±0.02
Bulk density (g/cm ³)	0.348±0.002	0.584±0.003	0.296±0.018
Yield of biomass pyrolysis (%)			
Charcoal	30.0±1.27	30.54±3.27	36.80±2.31
Bio-oil	54.04±3.02	48.00±2.08	41.40±4.01
Non condensable gases	15.96±4.19	21.30±5.76	21.80±2.63
Immediate analysis of charcoal (%)			
Fixed carbon	66.11±0.05	71.05±0.03	66.17±0.08
Volatile	29.57±0.06	23.54±0.07	24.42±0.05
Ash	4.32±0.02	5.42±0.03	9.42±0.03
Elemental analysis – charcoal			
Carbon	77.70±0.04	79.11±0.03	76.02±0.04
Hydrogen	4.62±0.02	3.45±0.04	2.61±0.02
Oxygen	13.63±0.05	15.64±0.03	16.01±0.05
Specific properties - charcoal			
Chemical Formula	CH0.70O0.13	CH0.52O0.14	CH0.34O0.16
HHV (MJ/kg)	30.63±0.02	31.23±0.01	29.43±0.02
LHV (MJ/kg)	29.62±0.02	30.47±0.01	28.96±0.02
Bulk density (g/cm ³)	0.48	0.62	0.36
Mean pore size (nm)	18.50	15.78	20.82

Source: the authors (2024)

The samples underwent thermal degradation within the prescribed temperature range for 400 minutes. Macaúba samples were thermally degraded for about 240 minutes at 330-420 °C, followed by 110 minutes at 420 °C, totaling 350 minutes. Cupuaçu experienced a transient

phase of 255 minutes, with temperatures rising from 290 to 360 °C, then held at 360 °C for 180 minutes, amounting to 435 minutes in the specified range. These conditions ensured the complete degradation of cellulose and hemicellulose. Tucumã and macaúba produced intact, strong charcoal pieces, while cupuaçu resulted in fragile, light charcoal bits (Fig. 2).

Table 2 shows that cupuaçu achieved the highest solid yield (36.8%), followed by macaúba (30.54%) and tucumã (30.0%). Tucumã had the highest bio-oil production (54%), followed by macaúba (48%) and cupuaçu (41.4%). Non-condensable gas yields ranged from 16 to 22%, with tucumã producing the least. Thermal degradation increased the original feedstock's carbon content more than two-fold, reaching 66 to 71%, while volatile matter ranged from 23 to 30%, indicating high-grade charcoal. Ash content varied from 4.0 to 10%, with cupuaçu having the highest (9.42%). Elemental composition showed carbon, hydrogen, and oxygen contents ranging from 76 to 78%, 2.6 to 4.6%, and 13.6 to 16%, respectively. Charcoal bulk density varied from 7 to 37%, with tucumã having the highest and macaúba the lowest. Charcoal's mean pore size ranged from 15-21 nm, with cupuaçu having the largest and tucumã the smallest, enhancing charcoal reactivity for combustion and gasification.

The elemental analysis allowed us to suggest an approximate chemical formula for the feedstocks (Table 2). This information is crucial for modeling combustion and gasification processes. The heating values of the feedstocks after carbonization were around 30 MJ/kg, representing an average increase of 40% over their parent biomasses. The Van Krevelen diagram (Fig. 3) illustrates the changes in the parent biomasses and charcoals, showing a linear correlation for the degree of conversion. Higher pyrolysis temperatures (>500 °C) would further decrease O/C and H/C ratios but require more energy and time.

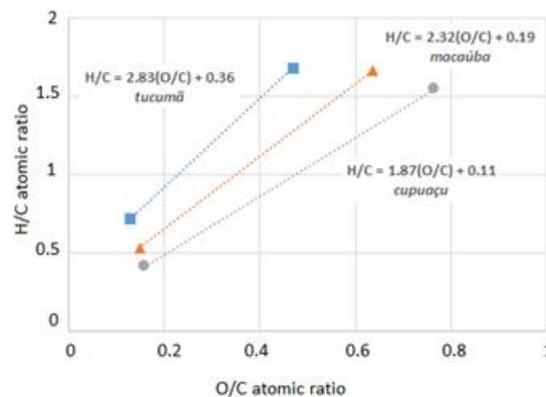


Figure 2. Van Krevelen diagram for the parent biomasses (higher O/C and H/C plots) and their respective charcoals. Source: the authors (2024).

Considering these charcoals as feedstocks for gasification, the remaining volatile matter (23-30%) facilitates particle ignition and heat production through oxidative gas phase reactions, preserving solid carbon for carbon reduction. The carbonization process made the charcoals' compositions more similar, as shown on the Van Krevelen diagram. This level of carbonization is satisfactory for further air-steam gasification, investigated using a thermochemical equilibrium model.

3.2 Bio-oil and Pyrolysis Gas Characterization

The liquid fraction from the slow pyrolysis of biomass is rich in chemicals distinct from fossil fuels due to high water content and oxygenated compounds. Compared to the parent biomass, this fraction has higher energy density and is easier to store and transport. The main constituents of bio-oil from cupuaçu are ethyl oleate (48.65%), linoleic acid (22.46%), and palmitic acid ethyl ester (12.11%). Macaúba bio-oil contains 46.03% oleic acid and 21.23% oxalic acid. For cupuaçu, n-tricosane (30.46%), linoleic acid (30.92%), and ethyl oleate (27.75%) are prevalent. The bio-oil's low heating value ranges from 13 to 18 MJ/kg, influenced by water and oxygen content. Further studies are needed to explore using pyrolytic oil for electricity and heat production in isolated communities. A blend of diesel and pyrolytic oil could be used to pilot the air-gas mixture of dual fuel engines. The liquid fraction collected during carbonization should be included in remote communities' energy plans or commercialized locally.

Thermal degradation of biomass produces char and gases, including condensable tarry products and non-condensable light gases. Figure 4 shows the TG and DTG curves of the three biomasses up to 400 °C. The first peaks, between 197-203 °C, indicate hemicellulose degradation, while peaks between 289-329 °C correspond to cellulose degradation. Lignin degradation occurs at a slower rate than cellulose and hemicellulose.

At 400 °C, degradation levels were 32% for cupuaçu, 34% for macaúba, and 36% for tucumã, making these charcoals suitable for a two-step energy conversion process. The FTIR spectra from cellulose peaks (Fig. 6) are shown in Fig. 5, with wavenumber bands and gas functional groups referenced from Wu *et al.* (2018). The transmittance profiles were similar across biomasses, with notable CO₂ peaks at 2360 cm⁻¹ and steam in the 3850-3650 cm⁻¹ range. Saturated aliphatic ester peaks were at 1750-1735 cm⁻¹ and unsaturated esters at 1730-1715 cm⁻¹. Macaúba and cupuaçu gases had a peak at 1716 cm⁻¹, indicating saturated aliphatic ketones, while tucumã peaked at 1764 cm⁻¹, likely from ethyl acetate. Nitroalkanes from

cupuaçu appeared at 1540 cm^{-1} , and for tucumã and macaúba at 1507 cm^{-1} . Lower wavenumber peaks at 669 cm^{-1} suggest aliphatic (C-C) compounds or CO_2 formation.

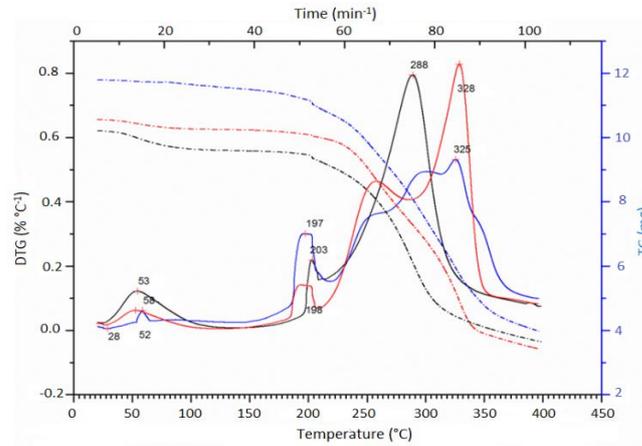


Figure 3. TG/DTG plots for the biomasses (cupuaçu-black; macaúba-blue; tucumã-red)

Source: the authors

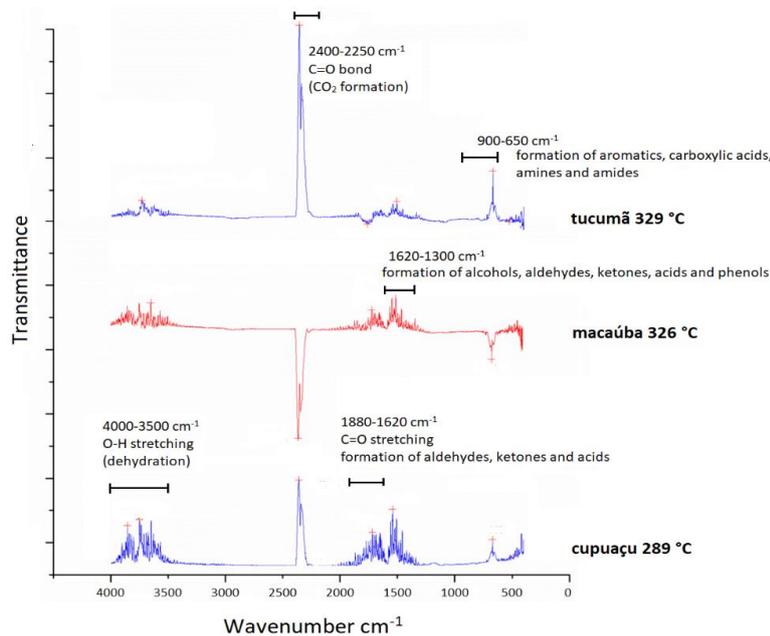


Figure 4. Infrared spectra of gases evolved from thermogravimetric analysis of the studied biomasses. Source: the authors (2023)

3.4 Feedstock Gasification

Since the code solves the energy equation, we prescribed a gasification equivalence ratio aiming to optimize cold gas efficiency at low (600 °C) and high (900 °C) system temperature,

depending on the type of feedstock. Charcoal gasification was set to take place at a relatively lower temperature because tar cracking should not be a primary concern. Conversely, biomass gasification occurs near 900 °C to improve thermal tar cracking. It was assumed a 10% heat loss from the reactor to the surroundings, based on the feedstock thermal input. Char losses were equivalent to 2% of the input feedstock (dry basis). CH₄ concentration in producer gas was set from the correlation proposed in (Mendiburu; Carvalho; Coronado, 2014). Tar concentration (C₆H_{12,1}-hexene) in syngas was adjusted based on the type of gasifier (Milne; Evans; Abatzoglou, 1998). Steam for biomass gasification was provided by the moisture in feedstock and was added to the airflow when the feedstock was dried charcoal. The preheated air mass flow rate was calculated based on the optimal process equivalence ratio ($2.5 < F < 5.0$), depending on the feedstock elemental composition. Thermal equilibrium predictions for charcoal were conducted using preheated air and steam with steam to dry ash-free charcoal ratio of 0.15. Feedstock composition, calorific value, ash, and moisture contents were taken from Table 2. It was also assumed a 1% moisture in charcoal.

Table 3 summarizes the output parameters as predicted by the equilibrium code. As can be seen from Table 3, the producer gas from the gasification of the biomasses and the derived charcoal retained 77 to 80% of the feedstock input energy based on the cold gas efficiency.

Table 3. Performance predictions from gasification of parent biomass and its charcoal

	Tucumã		Macaúba		Cupuaçu	
	biomass	charcoal	biomass	charcoal	biomass	charcoal
Gasification Temperature (°C)	903	600	903	601	902	612
Equivalence ratio (Φ)	3.29	2.5	4.34	2.94	4.93	2.74
Mass flow (kg/h)						
Feedstock (daf)	10	10	10	10	10	10
Air (preheated)	23.4	41.98	14.1	33.27	10.8	34.26
Steam	-	1.5	-	1.5	-	1,5
Moisture in feedstock	1.16	0.11	1.04	0.11	1.03	0.11
Ash in feedstock	0.29	0.45	0.16	0.57	0.29	1.04
Total feedstock	11.44	10.56	11.20	10.68	11.32	11.15
Gas composition (dry wt%)						
CO	24.66	26.81	30.59	35.30	31.78	34.05
CO ₂	6.48	4.78	6.51	0.79	7.88	2.11
H ₂	21.41	14.46	24.85	13.74	26.5	11.87
CH ₄ (prescribed)	1.98	0.2	1.82	0.18	1.76	0.15
Energy parameters						
Thermal input (kW)	67.39	85.26	59.22	86.75	53.53	81.75

LHV (kJ/Nm ³)	5,547	4,506	6,508	5,453	6,786	5,096
Cold Gas Efficiency (%)	79.49	77.71	80.48	78.93	80.41	77.69

Source: the authors

It is essential to highlight that the similarities in cold gas efficiency were attained at different reaction temperatures, for the charcoals and the parent biomasses. Despite their similarities in performance, charcoal gasification requires a much simpler gas cleaning process, due to the expected low tar content in the producer gas. Nevertheless, gasification experiments should be conducted to sustain such conclusions. Tar concentration in the syngas is strongly related to the system's gasification technology and other parameters. As regards the gas composition from biomass gasification, CO and H₂ concentrations ranged from 23.5 to 30% and 22 to 27%, respectively. Concentrations of CO and H₂ for charcoal were in the range of 28 to 35% and 8.7 to 9.3%, respectively. Lower heating value of biomass and charcoal were in excess of 5,000 kJ/Nm³ for most of the gasification predictions.

3.5 Integrated charcoal gasification dual-fuel engine cycle

The proposed energy conversion pathway is based on the integration of a charcoal gasifier into a diesel engine operating in dual-fuel mode. By such means, it is possible to eliminate complex gas cleaning systems and secondary waste generation, which is an essential requirement of the proposed energy extraction pathway. The diagram in Fig. 7 illustrates the mass and energy flows of the suggested combined system configuration. Charcoal thermal input was set to 85.1 kW, equivalent to the gasification of 11 kg/h of carbonized tucumã (Table 3). This amount of feedstock would claim the carbonization of 37.6 kg/h of as received tucumã (218.8 kW), considering the yields of the charcoal (30%) given in Table 2 for the specified biomass. The pyrolysis process would also generate about 20.3 and 5.9 kg/h of bio-oil and light gases, respectively. Light gases were assumed to have 16,224 kJ/kg of calorific value (ATSONIOS *et al.*, 2015). The bio-oil heating value was estimated as 15,000 kJ/kg, assuming 25% of water content in the condensed pyrolysis liquid (Lehto *et al.*, 2013). The input energy necessary for carbonization (kJ/kg) taken from Atsonios *et al.* (2015), in a dry ash-free basis is given by

$$\Delta h_{carb} = 991.5 + 3392 \frac{\mu_w}{1 - (\mu_w - \mu_a)} \quad (7)$$

In Eq. (7) μ_w and μ_a refers to the water and ash content of the feedstock, respectively. Therefore, the auger pyrolysis reactor would claim 14.1 kW for feedstock carbonization ($\Delta h_{carb} = 1,362$ kJ/kg).

The combustion of light gases would produce 26.6 kW of heat, sufficient to sustain the carbonization process. The bio-oil produced would retain 85.4 kW of thermal power. The carbonization plant's efficiency in terms of energy retained in charcoal and bio-oil would be 87.8%. Bio-oil can be commercialized to the nearest city for upgrading or further energy conversion in a more centralized way.

Regarding the integrated charcoal gasification power cycle, 85.3 kW of thermal input from charcoal would be available, from which 71 kW would be retained in the producer gas (4,980 kJ/m³). The dual-fuel engine was set to operate at a 0.85 equivalence ratio. Pilot ignition would be provided by straight vegetable oil (SVO), preferably from the seeds of tucumã with oil substitution set to 70% in terms of electric output power. Our previous research indicated that a small diesel generator set could produce electric power with pure straight vegetable oil at 423 g/kWh of specific fuel consumption. Engine operation with syngas as the primary source of energy and straight vegetable oil for pilot ignition reduced the oil specific fuel consumption to 140 g/kWh with the remaining power given by the combustion of premixed air and syngas with overall efficiency estimated as 27% (Rodrigues et al., 2009).

Based on these figures, the dual-fuel engine's power input would be 107.4 kW, from which 67.1 kW would be provided by the producer gas and 40.2 kW from tucumã seed oil for pilot ignition. Tucumã seed oil higher heating value of 39,381 kJ/kg (Fassinou, 2012) was estimated from its main fatty acid composition (Costa et al., 2016). At 27% conversion efficiency, the output electric power would be 28.9 kW_e. Engine exhaust gases would convey another 13.45 kW, corresponding to an exhaust temperature of 320 °C.

CHP efficiency, based on the higher heating value of tucumã charcoal and seed oil, of the charcoal integrated gasification dual-fuel engine cycle was inferred as 40.3%. The remaining waste heat was considered irrecoverable. The carbonization process can be conducted at 76.6% efficiency, and bio-oil can be used to process heat or even commercialized in the nearest municipality. The system's overall efficiency would be 50.2%, based on the higher heating value of as received tucumã (biomass) and seed oil. Heat losses from the carbonization plant were also taken as irrecoverable, for simplicity.

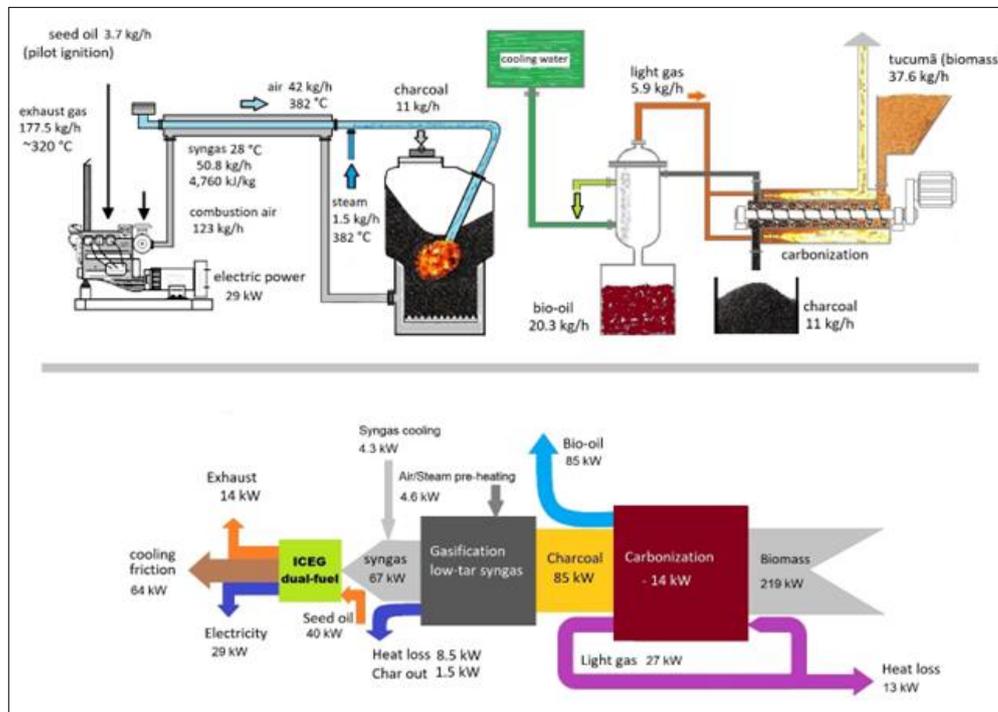


Figure 5. Mass and energy flows for the proposed energy conversion pathway

Source: the authors

Based on cost-effective and straightforward off-the-shelf hardware, the proposed energy extraction pathway seems very opportune for remote communities' electrification in the Amazon. The integrated charcoal gasification dual-fuel engine cycle would rely exclusively on renewable energy resources, paving the way to the sustainable development of the Brazilian rainforest's isolated communities. On a regional scale, the annual harvest of *T. grandiflorum* (cupuaçu) is about 6 million fruits. The shells make up about 1,440 metric tons of renewable feedstock, from which 533 metric tons of high-quality charcoal can be obtained. This charcoal amount represents 1.54×10^7 MJ of thermal energy capable of producing up to 1,131 MWh of clean electricity per year, considering a charcoal specific fuel consumption of 470 kg/MWh. The production of *A. aculeatum* (tucumã), as for the year 2012, was 368 metric tons, from which 140 metric tons of seeds can potentially be used as a renewable energy resource. The carbonization of 140 tons of tucumã seeds yields 42 metric tons of high-quality charcoal, from which up to 89 MWh of electricity could be produced regionally throughout the year. As for *A. aculeata* (macaúba), the fruit is not cultivated on a large scale in the Amazon region but extracted from the forest. However, there are studies to initiate macaúba palm trees' cultivation in degraded and poor soils of the Amazon basin.

Notwithstanding, the proposed waste to the energy route of tucumã and cupuaçu alone could produce, on a regional basis, up to 1,220 MWh of clean and renewable electricity per year. Taking the specific fuel consumption of modern diesel engines as 210 kg/MWh, the substitution of fossil fuel from the proposed energy conversion pathway would reach 256,200 liters per year, or 686 metric tons of CO₂ emissions avoided. In the Amazon region, diesel price ranges from 0.8 to 1.2 American dollars per liter, as for 2020 figures. Therefore, savings from oil substitution would reach a quarter of a million dollars per year if local communities rely on power generation from biomass waste. Bio-oil commercialization would also add revenue to the community.

4. Conclusions

This work aimed to evaluate the potential of three Amazon biomasses for distributed combined heat and power generation. The proposed energy extraction pathway was based on low-tar gas production from the gasification of charcoal to feed a heat engine without a complex cleaning system and generation of secondary waste. For that, as received, biomass was thermally degraded in the range of 290 to 430 °C for about 420 min yielding high-quality charcoal and bio-oil. Thermodynamic equilibrium predictions of charcoal gasification at about 600 °C resulted in cold gas efficiency over 77%. Fuel gas could be produced with no less than 4,500 kJ Nm⁻³ of calorific value. Producer gas from charcoal gasification would be consumed in a dual-fuel engine relying on straight vegetable oil for pilot ignition. The CHP plant's predicted efficiency was 40%, and the overall efficiency of the combined carbonization and power generation plants was calculated as 50%. The proposed waste-to-energy conversion route would be very effective in providing electricity, up to 1,220 MWh per year, and some income level for isolated communities of the Brazilian rainforest. By such means, local communities could generate electric power with more than 680 metric tons of CO₂ emissions avoided, on an annual basis.

6. References

- Aklouche, F. Z. et al. Predictive model of the diesel engine operating in dual-fuel mode fuelled with different gaseous fuels. **Fuel**, v. 220, p. 599–606, maio 2018.
- Atsonios, K. et al. Biomass fast pyrolysis energy balance of a 1kg/h test rig. **International journal of thermodynamics**, v. 18, n. 4, p. 267–275, 2015.
- Brandt, P.; Larsen, E.; Henriksen, U. High Tar Reduction in a Two-Stage Gasifier. **Energy & Fuels**, v. 14, n. 4, p. 816–819, 1 jul. 2000.
- Bridgewater, A. V. Biomass fast pyrolysis. **Thermal Science**, v. 8, n. 2, p. 50, 2004.

Cerón, I. X.; Higueta, J. C.; Cardona, C. A. Analysis of a biorefinery based on *Theobroma grandiflorum* (copoazu) fruit. **Biomass conversion and biorefinery**, v. 5, p. 183–194, 2015.

Ciconini, G. et al. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 208–214, 1 fev. 2013.

Corsini, A. et al. Vegetable Oils as Fuels in Diesel Engine. Engine Performance and Emissions. **69th Conference of the Italian Thermal Engineering Association, ATI 2014**, v. 81, p. 942–949, dez. 2015.

Costa, B. E. T. et al. Comparative study on the quality of oil extracted from two tucumã varieties using supercritical carbon dioxide. **Food Science and Technology**, v. 36, 2016.

Di Lascio, M. A.; Fagundes Barreto, E. J. **Energia e Desenvolvimento Sustentável para a Amazônia Rural Brasileira : Eletrificação de Comunidades Isoladas**. [s.l.: s.n.].

Fassinou, W. F. Higher heating value (HHV) of vegetable oils, fats and biodiesels evaluation based on their pure fatty acids' HHV. **Energy**, v. 45, n. 1, p. 798–805, 2012.

Fortes, I. C. P.; Baugh, P. J. Pyrolysis-GC/MS studies of vegetable oils from Macauba fruit. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 72, n. 1, p. 103–111, 2004.

Gómez-Barea, A.; Leckner, B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 4, p. 444–509, 2010.

Henriksen, U. et al. The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier. **Energy**, v. 31, n. 10–11, p. 1542–1553, 1 ago. 2006.

Idris, J. et al. Improved yield and higher heating value of biochar from oil palm biomass at low retention time under self-sustained carbonization. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 475–479, 1 out. 2015.

Kan, T.; Strezov, V.; Evans, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1126–1140, 1 maio 2016.

Lehto, J. et al. **Fuel oil quality and combustion of fast pyrolysis bio-oils**. [s.l.] VTT Espoo, Finland, 2013. v. 87

Lira, C. S. et al. Fast pyrolysis of Amazon tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) seeds in a bubbling fluidized bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 99, p. 23–31, 2013a.

Lira, C. S. et al. Fast pyrolysis of Amazon tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) seeds in a bubbling fluidized bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 99, p. 23–31, 1 jan. 2013b.

Mendiburu, A. Z.; Carvalho, J. A.; Coronado, C. J. R. Thermochemical equilibrium modeling of biomass downdraft gasifier: Stoichiometric models. **Energy**, v. 66, p. 189–201, 1 mar. 2014.

Milne, T. A.; Evans, R. J.; Abatzoglou, N. Biomass gasifier "Tars": their nature, formation, and conversion. 1998.

Miranda, M. R. Da S.; Veras, C. A. G.; Ghesti, G. F. Charcoal production from waste pequi seeds for heat and power generation. **Waste Management**, v. 103, p. 177–186, 15 fev. 2020.

Motta, P. E. F. Da et al. Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, 2002.

Müller, C. H. et al. **The Culture of Cupuacu**. Brasília DF: EMBRAPA-SPI, 1995.

Narula, S. A.; Bhattacharyya, S. Off-grid electricity interventions for cleaner livelihoods: A case study of value chain development in Dhenkanal district of Odisha. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 191–202, 20 jan. 2017.

Ons, O. N. Do S. E. **Maps of SIN ONS**. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-ons/mapas>>. Acesso em: 7 nov. 2018.

Rodrigues, A. C. et al. **Small Scale Electricity Generation from Simultaneous Burning of Straight Vegetable Oil and Syngas in Compression Ignition Engines**. 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems - ECOS. **Anais...Foz do Iguaçu**: 2009.

Safarian, S.; Unnþórsson, R.; Richter, C. A review of biomass gasification modelling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, p. 378–391, 2019.

Van Els, R. H.; De Souza Vianna, J. N.; Brasil Jr, A. C. P. The Brazilian experience of rural electrification in the Amazon with decentralized generation—The need to change the paradigm from electrification to development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1450–1461, 2012.

Fotografia: Jean Machado

