

Revista

Energia na

AMAZÔNIA

v. 1, n. 1, 2024

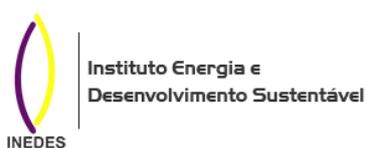



CDEAM
Centro de Desenvolvimento
Energético Amazônico



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

Beatriz Lima Carvalho Araújo (PET Design)

Letícia Lima de Souza (PET Design)

Editoração Eletrônica

Jean Machado Maciel da Silva

Greice Vaz

Editorial

Prezados(as) leitores(as),

A revista **Energia na Amazônia** apresenta com imenso contentamento seu primeiro número. A criação da revista é uma iniciativa do Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico (CDEAM), que em 9 de junho de 2024 completou 20 anos. Gostaria de destacar que a revista é de acesso livre e gratuito, tem publicação semestral e acolhe submissões em fluxo contínuo, de escopo interdisciplinar e com a temática de energia na Amazônia.

A publicação do primeiro número da revista **Energia na Amazônia** é uma obra comemorativa do aniversário de 20 anos do CDEAM, diante disso, os artigos científicos são de pesquisadores e convidados do CDEAM, que passaram pelo processo regular de análise por pares. Assim, este 1º número tem início com dois prefácios de professores da UNICAMP, Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira e Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay, expondo a importância do lançamento da revista **Energia na Amazônia**. Em seguida, a Apresentação com o Prof. Dr. Rubem Cesar Rodrigues Souza, que faz uma síntese da gênese e dos vinte anos de existência do CDEAM, demonstrando as contribuições e importância para o desenvolvimento do setor energético na Amazônia brasileira.

Na sequência, a seção Artigos apresenta seis trabalhos, o primeiro verifica o potencial da produção de biogás utilizando aguapé e gás de síntese do carvão do cupuaçu. O segundo trata de protótipos de fogão a lenha e forno de farinha mais eficientes. Já o terceiro apresenta um estudo de síntese e caracterização de um eletrodo de óxido de manganês em substrato flexível para aplicação como dispositivos de armazenamento de energia. O quarto apresenta uma proposta de gestão energética para a administração pública municipal. O quinto mostra os desafios e oportunidades para a engenharia de petróleo e gás no contexto da transição energética. Por fim, o sexto trabalho apresenta o desempenho do processo de torrefação com resíduos de biomassa lenhosa em um reator e elevador eletro vibrante. Portanto, o espectro de temas dá o tom da diversidade de abordagens que a revista contemplará para a temática energética.

A revista **Energia na Amazônia** agradece a todos os colaboradores (autores, editores, revisores e pareceristas), que nos auxiliaram de maneira tão especial com seu trabalho para o lançamento deste primeiro número e na qualidade dos trabalhos desta publicação. 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 1 | JANEIRO/JUNHO 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. 1, jan/jun. 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** PREFÁCIO
- 14** APRESENTAÇÃO: CENTRO DE DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO AMAZÔNICO – CDEAM
- 33** PRODUÇÃO DE BIOGÁS E SYNGAS A PARTIR DE BIOMASSA RESIDUAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
Cristiane Daliassi Ramos de Souza, Rubem Cesar Rodrigues Souza, Omar Seye
- 48** CONCEPÇÃO, DESENVOLVIMENTO E DIFUSÃO DE FOGÕES A LENHA E FORNOS DE FARINHA DE QUEIMA LIMPA NA AMAZÔNIA – UMA ANÁLISE CRÍTICA
Gilberto Martins
- 60** ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO MnO_2 SUPOSTADO EM SUBSTRATO FLEXÍVEL VISANDO DISPOSITIVO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
Ewerton Lima Menezes, Fernanda de Nazaré Bailosa Silva, João Carlos Martins da Costa, José Costa de Macêdo Neto, Magno da Cunha Nascimento, Raimundo Ribeiro Passos, Leandro Aparecido Pocrifka
- 73** AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROCESSO DE TORREFAÇÃO DE BIOMASSA LENHOSA UTILIZANDO UM REATOR E ELEVADOR ELETRO VIBRANT
Dimitri O. Silva, Diego. C. Oliveira, Alan N. Carneiro, Fernando H. B. Santos, Danielle R. S. Guerra, Marcelo O. Silva, Manoel F. M. Nogueira
- 90** A ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS NO AMAZONAS E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: DESAFIOS E OPORTUNIDADES
Joemes de Lima Simas, Ana Carolina Monte Almeida, Fernando Gadelha de Abreu, Robertom Guedes do Amaral
- 98** GESTÃO ENERGÉTICA MUNICIPAL E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA
Rubem Cesar Rodrigues Souza, Thainara Costa da Silva, Karen Barbosa de Melo, José Maria Ypiranga de Carvalho, Márcia Drumond Sardinha

Fotografia: Gleilson Medins



PREFÁCIO



Prof. Dr. Luiz A. Horta Nogueira
EXCEN UNIFEI Itajubá MG
NIPE UNICAMP Campinas - SP

A Amazônia, em grande parte localizada em terras brasileiras, ocupando mais de 6,7 milhões de quilômetros quadrados, compartilhados por nove países, apresenta uma estupenda diversidade natural, potenciais e riquezas sabidas e suspeitadas, percursos recentes e por descobrir. Os seus tantos biomas e contextos sempre nos desafiam a reforçar as esperanças de um futuro desejável, em um amplo sentido, humano e natural, que escape de tragédias anunciadas. Como? Quais os caminhos, quais os destinos?

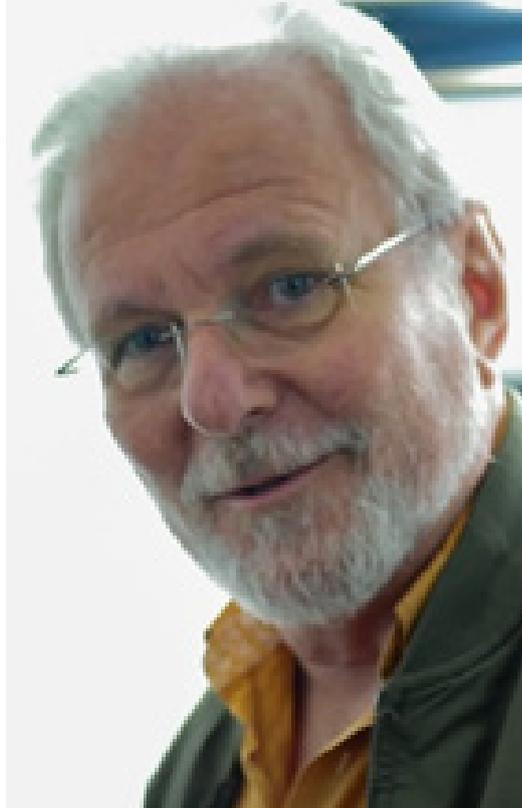
Desde a chegada dos europeus em nosso continente, dedicados naturalistas e estudiosos têm buscado decifrar com fascínio o universo amazônico. Entretanto, ele guarda ainda muitos segredos, ao tempo em que a penetração da dita civilização e os modernos sistemas de exploração econômica avançam por suas bordas. Que consequências podemos esperar? Quais os limites a ter em conta?

A Constituição brasileira procurou balizar esse tema, reconhecendo que a Amazônia não deve ser assumida com um santuário intocado, e lhe distingue como um “patrimônio nacional e que sua utilização será feita de forma sustentável”. Correto, mas como assim?

Respostas ou novas perguntas para essas relevantes questões só serão encontradas com auxílio de estudos aplicados, da pesquisa comprometida com a sociedade e o ambiente, em seus aspectos e nuances tão próprios da Amazônia. Por isso, deve ser saudada e muito bem recebida a iniciativa do Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico da Universidade Federal do Amazonas, de editar um periódico sobre a Energia na Amazônia.

Há um inesgotável manancial de temas por explorar. Seja considerando a necessidade de ampliar a oferta sustentável de energia, em seus diversos vetores, inclusive mediante a integração energética com países e regiões vizinhas, seja valorizando a eficiência no uso da energia nos setores de uso final, a energia é mesmo essencial para o desenvolvimento adequado e racional da Amazônia. Precisa, deve e merece ser estudada, avaliada e debatida em todas suas vertentes, técnica, econômica, social e ambiental.

Com rigor termodinâmico, energia pode ser definida como a capacidade de fazer algo acontecer. Portanto, benvinda seja a Energia na Amazônia, que contribua para fazer acontecer um mundo melhor para todos.



Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay
NIPE UNICAMP Campinas - SP

A transição energética visa uma quebra do atual *modus vivendi*, envolvendo não só a geração de energia, mas também o seu consumo, armazenamento e reaproveitamento. O que se busca é uma migração gradual de fontes de energia poluentes para fontes de energia renováveis. Para se reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e as suas consequentes influências nas mudanças climáticas é necessário, entre outras medidas, aumentar a proteção do meio ambiente, incrementar a gestão de resíduos, realizar ações que visam ganhos de eficiência energética e promover a digitalização de equipamentos e processos.

O Brasil, que hospeda a maior parte da Floresta Amazônica, tem uma grande res-

ponsabilidade e oportunidade na Amazônia. Esta região é essencial para a preservação da biodiversidade e a regulação do clima. Ela é um ativo do país, se forem implantados programas que conciliem desenvolvimento social, econômico e energético com preservação ambiental. Neste contexto, é muito bem vinda a **Revista Energia na Amazônia**.

O lançamento desta revista é uma iniciativa do Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico (CDEAM), que completa 20 anos de existência em junho de 2024. Este primeiro número da Revista traz uma resenha histórica com a gênese do CDEAM e suas principais ações até o presente. Além disso, a Revista contém seis artigos técnico-científicos.

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO AMAZÔNICO – CDEAM

No ano de 2024, quando o Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM, da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, completa vinte anos de existência, foi considerado oportuno, registrar sua gênese, alguns dos seus legados e outros feitos que demonstram as suas contribuições e importância para o desenvolvimento do setor energético na Amazônia brasileira.

GÊNESE DO CDEAM

No ano de 1995, o professor Rubem Cesar Rodrigues Souza, professor efetivo do curso de Engenharia Elétrica e o professor substituto Roberto Devienne Filho, ambos do Departamento de Eletricidade - DE do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, submeteram proposta, que foi aprovada, de criação do Grupo de Energia, que atuaria, no primeiro momento, somente com estes dois docentes podendo, entretanto, agregar outros desde que lotados no DE. O objetivo do Grupo consistia em iniciar um processo para reunir competências na área de energia e desenvolver ações de pesquisa, extensão e formação de recursos humanos com foco, principalmente, nas áreas de fontes renováveis de energia e de

eficiência energética. Para levar adiante as ações do Grupo de Energia foi posto em operação o projeto de Escritório Escola da Faculdade de Tecnologia – FT, que estava aprovado pelo Conselho Departamental da Unidade, porém, sem que houvesse um docente para implementá-lo. Registre-se que, à época na FT, existiam somente os cursos de Engenharia Elétrica, Engenharia Civil e Desenho Industrial atualmente denominado de Curso de Design. Para viabilizar a remuneração de servidores, docentes ou não, a solução encontrada pelos professores foi articular a celebração de um convênio entre a UFAM e o Instituto Euvaldo Lodi – IEL da Federação das Indústrias do Estado do Amazonas, o que aconteceu. Mesmo com um cenário de



Prof. Rubem Cesar Rodrigues Souza



Prof. Roberto Devienne Filho

poucas fontes de recursos, ações foram desenvolvidas à época, constituindo-se, basicamente, de orientação estágio e trabalho de conclusão de curso na graduação, além de atividades de extensão e pesquisa no âmbito do programa de iniciação científica da universidade, valendo-se, portanto, quase sempre, de recursos da própria universidade.

Em 1997, o professor Rubem vai cursar seu doutorado na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. No ano seguinte, o professor Devienne se desliga da UFAM, uma vez que este tinha contrato temporário. Na UNICAMP, o professor Rubem conhece o Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE e entende que essa estrutura, de caráter multidisciplinar, seria adequada para implementar na FT e dar continuidade à ideia de desenvolver a área de energia. Assim, no final do ano de 1998, foi submetido para a direção da FT o projeto de criação do Núcleo de Eficiência Energética – NEFEN, sendo aprovado em

janeiro de 1999. Uma vez que o NEFEN era subordinado à direção da FT este poderia agregar docentes dos demais cursos da Faculdade. Em 2000, o professor Rubem Cesar retorna do doutorado e assume a missão de operacionalizar o Núcleo.

Nos anos seguintes vários projetos foram elaborados com grande sucesso, o que gerou interesse de outras áreas da FT em constituírem seus núcleos.

As ações do NEFEN proporcionaram à UFAM um papel de destaque na área de energia na região. Nesta época, a UFAM se tornou evidente tanto em atividades de pesquisa quanto na promoção e participação em eventos técnicos científicos, bem como, na transferência de conhecimento por meio de publicações na área de energia.

Em dezembro de 2001, o professor Rubem é convidado pelo professor Dr. Sérgio Vardir Bajay para participar, em Brasília, das atividades de elaboração do Plano Decenal

do Setor Elétrico, dado que este havia sido seu professor durante o doutorado. Durante as atividades em Brasília, o professor Rubem é chamado pelo então Secretário de Energia do Ministério de Minas e Energia - MME, Sr. Afonso Henrique Moreira Santos, que havia sido seu orientador no mestrado. O Secretário pediu que o professor Rubem, dada sua experiência com o setor elétrico na Amazônia, trocasse ideias com o funcionário do MME que estava responsável pela retomada do Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM. Desta feita, dentre outras, surgiu a proposta de criação de um Centro de Formação de Recursos Humanos em Fontes Renováveis de Energia no âmbito da UFAM, sendo imediatamente aprovada pelo Secretário. Assim, foi celebrado o Convênio 012/2001 – MME, tendo a Fundação de Apoio Institucional Rio Solimões - UNISOL como interveniente e o NEFEN junto à UFAM como executor. O objetivo do convênio consistiu na implantação do Centro com a

função de apoiar as ações do Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM, dado que era evidente que sem massa crítica na região, qualquer ação de disseminar tecnologias de energias renováveis, nas condições postas à época, estariam fadadas ao insucesso. Foi então construída uma infraestrutura na Fazenda Experimental da UFAM, localizada no km 38 da BR 174, constituída dos seguintes laboratórios: energia solar térmica e fotovoltaica, hidroenergia, biodigestão, gaseificação e análise físico-química de biomassa. Registre-se que foi de importância fundamental para o sucesso dessa ação o empenho e competência do Engenheiro Aureo Albuquerque de Matos. Essa infraestrutura foi primordial para apoiar o processo de capacitação e formação de recursos humanos na área de fontes renováveis de energia, além de atividades de PD&I. Vale salientar que até os dias atuais a infraestrutura inicial existe, tendo sido ampliada.



Centro de Formação de Recursos Humanos na Fazenda Experimental da UFAM (2002).

Na busca por fontes de recursos financeiros, o NEFEN foi credenciado junto ao Comitê das Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na Amazônia – CAPDA para desenvolver ações de P&D no âmbito da Lei de Informática. Nessa ocasião, vários projetos estavam em curso e a posição do Núcleo no organograma organizacional teria que subir na hierarquia institucional ou não teria condições de manter o nível de atividades que desenvolvia e, muito menos ampliar. Assim, o professor Rubem, na condição de suplente da UFAM, no CAPDA, submeteu, no ano de 2003, a proposta de um Programa Prioritário intitulado Programa de Desenvolvimento Energético Amazônico – PRODEAM, com abrangência em toda a Amazônia Ocidental, sendo aprovada. O PRODEAM, em seu início, teve como um de seus objetivos a criação do Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM, na condição de órgão suplementar da UFAM, portanto, subordinado diretamente ao reitor, encampando toda a infraestrutura do NEFEN e conseqüente extinção deste. Dando execução ao Programa, em 09 de

junho de 2004 deu-se a criação do CDEAM pela resolução Nº 009/2004 do Conselho Universitário da UFAM.

Embora não tenha havido mudanças em termos de infraestrutura, a mudança na governança interna foi fundamental para que o CDEAM avançasse nas suas contribuições para o desenvolvimento do setor energético regional.

Em 2015, o Centro obteve credenciamento junto a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP para desenvolver projetos de PD&I. Esse credenciamento, no ano de 2022, foi ampliado para outras áreas com a incorporação de pesquisadores e infraestrutura de laboratório de vários cursos de graduação da Faculdade de Tecnologia e do Instituto de Ciências Exatas.

Atualmente o Centro conta com 35 doutores, uma mestre em doutoramento, uma mestranda e um graduado, que atuam em 11 diferentes áreas do conhecimento.

LINHAS DE ATUAÇÃO DO CDEAM

Ao longo de sua existência o CDEAM desenvolveu diversas ações buscando atingir os seguintes objetivos:

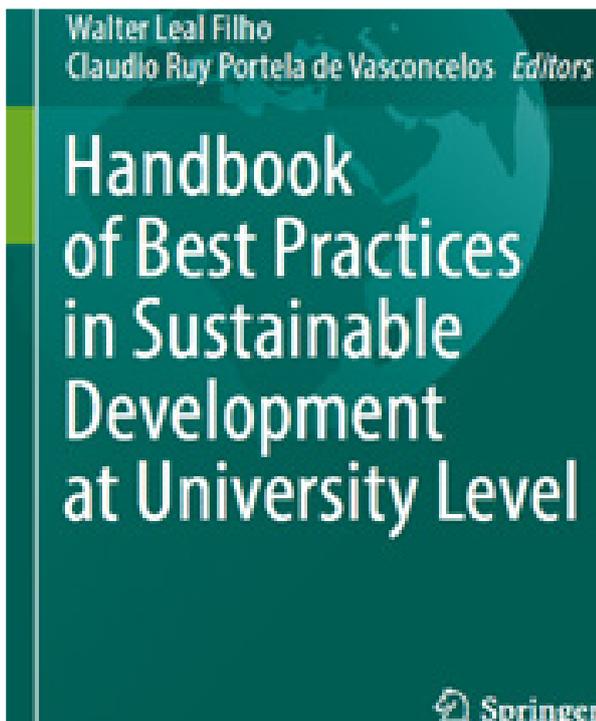
- Ampliar as opções energéticas. Pesquisas foram realizadas no sentido de conhecer as propriedades de matérias-primas regionais para uso energético, tais como: a casca do cupuaçu, o caroço do açaí, espécies lenhosas, óleos vegetais, a casca de arroz, o aguapé, dentre outros.
- Dominar rotas tecnológicas para uso de matéria-prima regional. Foram realizados estudos com gaseificação, biodigestão, produção de hidrogênio e uso em célula a combustível para geração de eletricidade, briquetagem, craqueamento e produção de biocombustíveis.
- Disseminar a cultura do uso eficiente da energia elétrica. Foram desenvolvidos projetos de implantação de tecno-

logias eficientes no setor residencial, industrial e na própria universidade. Além disso, foi desenvolvido software para apoiar ações dessa natureza.

- Disseminar fontes renováveis de energia para atendimento de localidades isoladas na Amazônia. Foram implementados projetos que possibilitaram demonstrar a viabilidade técnica, econômica, ambiental e legal, de modelos de negócios de energia em comunidades isoladas no estado do Amazonas.
- Disseminar informações e promover o debate sobre a problemática energética local e regional. Vários eventos foram promovidos, quase sempre em parceria, para socializar informações sobre o setor energético e discutir soluções para o desenvolvimento do setor energético local e regional. Cabe aqui registrar os eventos realizados

pela Superintendência da Zona Franca de Manaus - SUFRAMA, denominado Feira Internacional da Amazônica, nos quais o CDEAM foi o responsável pelo Seminário de Energia nas três últimas versões, das quatro realizadas.

- Formar recursos humanos. O CDEAM capacitou profissionais, em nível de especialização, oferecendo curso *lato sensu* de Fontes Renováveis de Energia, Eficiência Energética e Planejamento de Sistemas Energéticos. Além disso, em parceria com a Universidade Federal do Pará – UFPA, formou doutores em Engenharia Elétrica. Registre-se que os concludentes eram docentes da UFAM, em sua maioria, e tinham formação em Engenharia Civil, Matemática e Estatística, que estavam em busca de oportunidade para evoluírem em suas capacitações.



As ações do CDEAM tiveram reconhecimento internacional, e foram apresentadas como exemplo a ser seguido, ao serem descritas no capítulo intitulado *Experiences of Sustainable Energy Development Within Federal Higher Education Institutions in the Amazon: The Case of the State of Amazonas* (Experiências de Desenvolvimento Energético Sustentável em Instituições Federais de Ensino Superior na Amazônia: O Caso do Estado do Amazonas) da obra *Handbook of Best Practices in Sustainable Development at University Level* (Manual de melhores práticas de Desenvolvimento Sustentável Desenvolvidas por Universidades), publicada pela editora Springer no ano de 2022.

PROJETOS EMBLEMÁTICOS

A história do CDEAM, bem como, a sua gênese, são marcadas pela execução de dezenas de projetos. Inclusive, alguns destes estavam bem à frente de seu tempo. Em projeto realizado em 1993 foram instalados sistemas fotovoltaicos em escolas e postos de saúde.

No ano de 2008, foi desenvolvido e testado em campo, protótipos de medição de energia elétrica inteligente, sendo um para instalação na unidade consumidora e outro junto ao transformador da rede distribuição que se comunicavam entre si, bem como, com a unidade de gerenciamento na sede da concessionária. Em outros projetos foram projetados e desenvolvidos equipamentos, tais como: briquetadeira, unidade de craqueamento de óleo vegetal, gaseificador entre outros, demonstrando a capacidade de migrar do nível de maturidade tecnológica (TRL) 1 para o nível 8 em uma escala que vai

até 9. Entretanto, três projetos são merecedores de registro neste texto, e sobre os quais seguem algumas informações relevantes, esclarecendo que o primeiro antecede a criação, inclusive, do NEFEN.

Tecnologias Alternativas para o Meio Ambiente Rural: Aspectos técnicos e socioeconômicos. No ano de 1993, o professor Rubem Cesar coordenou o projeto de pesquisa pelo Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica - PIBIC/CNPq intitulado Estudo dos Potenciais Energéticos do Projeto de Assentamento Iporá (PAI), tendo como bolsista o acadêmico de Engenharia Elétrica, Achilles de Araújo Malveira. As informações produzidas neste projeto subsidiaram a elaboração da proposta do projeto Tecnologias Alternativas para o Meio Ambiente Rural: Aspectos técnicos e socioeconômicos, que foi desenvolvido no período de dezembro de 1996 a dezembro de 1998, com re-





Pesquisadores (Breno e Siomara) instalando sistema fotovoltaico.



Agroindústria de polpas

cursos do Programa Trópico Úmido (MCT/ CNPq). A coordenação do projeto foi do prof. Jorge de Andrade Filho, enquanto a coordenação das atividades da área social foi levada a efeito pela professora Maria do Perpétuo Socorro Rodrigues Chaves do curso de Serviço Social e as ações na área de energia ficaram sob a responsabilidade do professor Rubem Cesar da Engenharia Elétrica, contando ainda com a consultoria do Dr. Gilberto Martins, atualmente docente da Universidade Federal do ABC - UFABC. O projeto se desenvolveu no Assentamento Iporá entre os quilômetros 127 e 146, na margem direita da rodovia AM 010 (Manaus-Itacoatiara), abrangendo parte dos municípios do Rio Preto da Eva e Itacoatiara, no estado do Amazonas. O projeto foi o primeiro com recursos mais expressivos e que possibilitou pôr em prática a atuação de uma equipe multidisciplinar atuando de forma interdisciplinar, abordando diversas tecnologias e seus desdobramentos para o desenvolvimento local. As tecnologias experimentadas foram as seguintes: i) roda d'água; ii) siste-

ma solar fotovoltaico *off grid* em escola e posto de saúde; iii) gaseificador a carvão vegetal para bombeamento de água e; iv) fogão de queima limpa, tecnologia essa desenvolvida pelo Dr. Gilberto Martins.

Esse projeto possibilitou um grande aprendizado sobre as tecnologias, sobre as populações rurais e sobre a complexa relação de instituições públicas com a população em assentamentos rurais. O projeto também deixou claro que a abordagem multidisciplinar é adequada para lidar com problemas complexos como os vivenciados no setor energético, quando o foco é a energia como insumo do processo de desenvolvimento.

Modelo de Negócios de Energia Elétrica em Comunidades Isoladas na Amazônia - NERAM. O projeto NERAM foi desenvolvido no período de fevereiro de 2005 a julho de 2008, no município de Manacapuru-AM contemplando cinco comunidades e um total de 198 domicílios, em área que à época não era eletrificada. A concepção e coordenação do projeto foi do professor

Rubem Cesar. Buscando soluções para a universalização do serviço de energia elétrica na Amazônia, o CNPq, em parceria com o Ministério de Minas e Energia, lançou o Edital CT-Energ 03/2003, com a perspectiva de selecionar projetos que demonstrassem soluções alternativas para geração de energia elétrica em comunidades amazônicas, alicerçadas no uso de fontes renováveis de energia e com potencial de replicação. O projeto NERAM contou com uma equipe multidisciplinar envolvendo onze áreas de conhecimento distintas.

As principais ações desenvolvidas:

- Constituição da Cooperativa Energética Agroextrativista Rainha do Açaí – CEARA.
- Implantação de uma agroindústria de polpas de fruta, que inicialmente seria somente polpa de açaí, porém depois verificou-se a possibilidade de produzir, também, polpa de maracujá e goiaba.
- Implantação de um sistema de geração de energia bicomcombustível, funcionando com óleo diesel e com gás de síntese proveniente de um gaseificador que fazia uso do caroço do açaí, portanto, resíduo do processo produtivo.
- Implantação de unidade de produção de farinha de peixe (piracuí) e farinha de mandioca.
- Desenvolvimento de embalagem para todos os produtos, bem como, a logomarca da cooperativa.
- Implantação de unidade de produção de farinha de peixe (piracuí) e farinha de mandioca.

- Desenvolvimento e implantação de sistema de tratamento de água inovador.



Marca da Cooperativa



Embalagem de polpa



Depósito de biomassa com usina de geração de eletricidade ao fundo

Todo o empreendimento foi legalizado junto ao Ministério da Agricultura e aos órgãos ambientais. Os comunitários receberam diversos treinamentos de modo a ocuparem os postos de trabalho criados.

É de se evidenciar que o modelo de negócio desenvolvido é passível de utilização até os dias atuais com maior potencial de ganhos, em face do novo ambiente regulatório. Além disso, este não está alicerçado na tecnologia em si, portanto, qualquer tecnologia de energia renovável pode ser

utilizada. As bases do modelo são o cooperativismo, a sustentabilidade energética, a capacitação local progressiva e contínua e, parcerias estratégicas.

Vale ressaltar que o projeto foi objeto de uma edição exclusiva do Programa Eco Senado da TV Senado.

O projeto NERAM deixou claro que é possível desenvolver o interior da Amazônia de forma sustentável. Ficou evidente, também, que o desafio está muito mais associado à falta de políticas públicas adequadas do que a tecnologias apropriadas.



Produção de Farinha de mandioca e farinha de peixe.

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM ETANOL DE MANDIOCA NA AMAZÔNIA

Este projeto foi desenvolvido no âmbito da carteira de P&D/ANEEL da empresa Manaus Energia S/A, no período de dezembro de 2010 a novembro de 2013. O projeto foi demandado pela Eletrobras visando o uso de etanol de cana-de-açúcar, no entanto, as ponderações apresentadas pelo professor Rubem Cesar, convidado para discutir a viabilidade da ideia, levou à mudança da procedência do etanol, além da inserção de outras ações. Assim, o projeto nasceu com o objetivo de avaliar a

viabilidade técnica, econômica, ambiental e legal, para produção e uso do etanol de mandioca (*Manihot esculenta*) para geração de energia elétrica na Amazônia. Uma das frentes da pesquisa consistiu na produção em pequena escala de etanol de mandioca, que necessitava de domínio tecnológico, uma vez que seria feito uso de cultivares desenvolvidas para o ambiente amazônico e, segundo a EMBRAPA-Occidental, havia mais de trezentas variedades de cultivares.

Assim, foram pré-selecionadas cinco cultivares que foram plantadas na Fazenda Experimental da UFAM localizada no km 38 da BR 174 (Manaus-Boa Vista). Registros da época informavam que a produtividade média no cultivo, na região, era de 10 ton/ha, enquanto o resultado obtido foi de 25 ton/ha. Para a produção do bioetanol foi implantada uma usina com capacidade de produção de 1.000 litros/dia. A mandioca era lavada, descascada e triturada. A biomassa triturada era bombeada para reatores para produção da glicose e bioetanol, sendo que esse processo era feito mediante o controle de temperatura e de velocidade de agitação e a introdução de levedura e enzima.



Colheita de mandioca para avaliação da produtividade

O produto resultante era submetido à torre de destilação para separação do bioetanol do vinhoto. Todo esse procedimento era feito primeiramente em bancada para setar parâmetros e, posteriormente, na planta piloto. Uma vez produzido, o bioetanol era submetido a uma série de análises de sorte a verificação sua adequação às normas da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – ANP. Como resultado foi produzido bioetanol dentro das especificações de mercado. Outra frente da pesquisa foi o teste em campo

de dois grupos geradores a etanol de 250 kW cada, produzidos pela empresa Vale Soluções em Energia - VSE. Para tal, foi realizada a ampliação da termelétrica a óleo diesel da Vila de Lindóia, localizada no município de Itacoatiara/AM, que atendia 1.107 unidades consumidoras. Registre-se que, até então, todos os testes do equipamento haviam sido desenvolvidos unicamente em laboratórios da VSE. Foi construído um tanque específico para o etanol com capacidade para 60.000 litros e foi desenvolvido um sistema supervisorío que possibilitava monitorar em tempo real *on line* 42 variáveis. Às 11:30 h do dia 5 de setembro de 2013, as unidades consumidoras estavam sendo supridas unicamente pelos grupos geradores a etanol, sendo esta a primeira vez que isso ocorre em nível mundial. O aumento de demanda, quando ultrapassava a capacidade dos geradores a etanol, era complementada com as unidades a diesel.



Reatores e torre de destilação

O projeto possibilitou levantar informações necessárias para concluir que a solução é viável técnica, econômica, ambiental e legalmente, bastando que políticas públicas adequadas sejam implementadas. É mister destacar que a mandioca pode ser plantada em áreas antropizadas e não há risco de competir com a produção de alimentos, desde que o processo seja conduzido de forma adequado.



Grupos geradores a etanol na usina de Lindóia.

PARCERIAS

Todas as ações relatadas e diversas outras que não foram mencionadas foram possíveis graças às parcerias estabelecidas. Diversos foram os financiadores das ações do CDEAM, cabendo registrar os seguintes: CNPq, FINEP, SAMSUNG, Ministério de Minas e Energia, Ministério do Meio Ambiente, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM, Manaus Energia S.A., Boa Vista Energia S.A., Centrais Elétricas do Brasil - Eletronorte, dentre outros. Na execução das ações o Centro contou com o apoio de instituições, como: Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI e Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

O CDEAM buscou relações, também, no cenário internacional, sendo merecedor de registro a parceria com a Universidad Nacional del Comahue, articulada pela professora Eliana Aqueveque de Delgado, desta instituição, que possibilitou a vinda dela para ministrar o curso Introdução à

Indústria de Petróleo e Gás e, também, a ida do prof. Rubem para proferir palestras na Argentina. Com o apoio da Dra. Rejane Duzat do INPA, o Centro promoveu o intercâmbio de professores e recebeu seis alunos do programa de mestrado em energias renováveis da Universität Oldenburg na Alemanha, para fazerem estágio em nossas dependências. Essa parceria redundou em uma orientação de mestrado de acadêmico daquela instituição, levada a efeito pelo prof. Rubem. A atuação da Sra. Alia Ghandour foi primordial para que tivéssemos a oportunidade de enviar docentes para ações junto ao National Renewable Energy Laboratory – NREL, localizado em Boulder, Colorado, nos Estados Unidos da América. Também contribuiu para a inserção internacional do CDEAM, a parceria com a Stanford University, capitaneada pelo prof. Dr. Adilson de Oliveira do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, nos possibilitando acolher estudantes do Programa de Energia e Desenvolvimento Sustentável de Stanford que estiveram acompanhados pelo professor Dr. David G. Victor, para

receberem capacitação via palestras e visitas de campo acerca da problemática energética na Amazônia. Essas parcerias,

a partir do ano de 2019, se ampliaram e a menção a estes novos parceiros será comentada no próximo tópico.

O FÓRUM PERMANENTE DE ENERGIA – FPE/UFAM

Quando o professor Rubem Cesar retornou de seu pós-doutorado na Unicamp em meados do ano de 2018, este reassumiu a direção do CDEAM que estava sob a responsabilidade da Sra. Márcia Drumond Sardinha desde o final do segundo semestre do ano de 2017. A Sra. Márcia anteriormente exercia a Coordenação de Projetos e Captação de Recursos e atuava como pesquisadora do Centro há vários anos. Refletindo sobre a efetividade das ações desenvolvidas, houve consenso que deveria ser trabalhada a problemática das políticas públicas inexistentes ou mal elaboradas para que os resultados almejados fossem alcançados, além de impulsionar as ações de PD&I e de formação de recursos humanos, o que exigiria congregação de atores estratégicos. Assim, o professor Rubem, procurou o reitor da UFAM, prof. Dr. Sylvio Mário Puga Ferreira, solicitando autorização para criação do Fórum Permanente de Energia da UFAM – FPE/UFAM, cujo objetivo precípuo seria propor políticas públicas para o desenvolvimento do setor energético do estado do Amazonas, sendo a ideia prontamente apoiada. Considerando as competências administrativas do CDEAM, o FPE/UFAM foi criado em reunião da diretoria em 04 de fevereiro de 2019. Graças à rede de contatos estabelecida ao longo de sua história, o Centro arregimentou quinze instituições para dar início às atividades

do FPE, sendo estas representantes do governo, da academia, da indústria e o do terceiro setor com atuação tanto na área de energia quanto de meio ambiente, compondo, portanto, a denominada hélice quádrupla da inovação. Inovação? Sim. Era preciso inovar na postura da universidade e no processo de construção de políticas públicas.

Atualmente, além da Universidade Federal do Amazonas que, através do CDEAM, o preside, o Fórum conta com os seguintes membros: Agência Brasileira de Inteligência – ABIN, Agência Reguladora dos Serviços Públicos Delegados e Contratados do Estado do Amazonas – ARSEPAM, Amazonas Energia S/A, Associação Amazonense de Municípios, Banco da Amazônia S/A – BASA, Banco do Brasil S/A, Centrais Elétricas do Norte do Brasil – ELETRONORTE, Comando Militar da Amazônia – CMA, Companhia de Desenvolvimento do Estado do Amazonas – CIAMA, Companhia de Gás do Amazonas – CIGÁS, ENEVA S.A., Federação das Indústrias do Estado do Amazonas – FIEAM, Governo do Estado do Amazonas, Instituto Energia e Desenvolvimento Sustentável – INEDES, Instituto Energia e Meio Ambiente – IEMA, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Instituto Mamirauá, Ministério Público Federal, Prefeitura Municipal de Manaus, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas

Empresas – SEBRAE/AM, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI/AM, Sociedade Brasileira de Planejamento Energético – SBPE, Superintendência da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA, Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Universidade Federal de Roraima – UFRR, Universidade Federal do Acre – UFAC, Universidade Federal do Pará e WWF-Brasil. Chama a atenção o crescimento na quantidade de instituições que chegou a dobrar e também a adesão de membros sediados para além do estado do Amazonas.

De maneira sucinta destacamos os seguintes resultados obtidos até o presente:

- Aprovação da Lei No. 5.350, de 22 de dezembro de 2020, que dispõe sobre a Política Estadual de Incentivo ao Aproveitamento de Fontes Renováveis de Energia e Eficiência Energética no âmbito do estado do Amazonas. Esta lei foi gestada no Fórum e encaminhada para as devidas tratativas junto ao executivo do governo estadual.
- Criação da Secretária Executiva de Mineração, Energia, Petróleo e Gás no âmbito do Governo Estadual, posteriormente, extinta em face à criação da Secretaria de estado de Energia, Mineração e Gás – SEMIG, no ano de 2023. Entende-se que as ações do FPE foram de vital importância para essa ação, dado que em nenhuma outra administração estadual se deu a criação de uma secretaria para tratar do tema energia.
- Retomada das atividades do Conselho Estadual de Energia. Este conselho foi criado por força de lei no ano de 2013, funcionou até 2014 e entrou em inatividade. O FPE demonstrou a importância do Conselho e, assim, em 2023 este foi posto novamente em operação.
- Elaboração da Proposta de lei de marco legal para política energética para o Estado do Amazonas. A elaboração da proposta de lei foi desenvolvida por uma Câmara Técnica criada no âmbito do Conselho Estadual de Energia, ficando a coordenação sob a responsabilidade do governo estadual e a relatoria foi levada a efeito pela UFAM na figura do professor Rubem diretor do CDEAM. Esta lei está sendo avaliada pelo executivo para posterior submissão à Assembleia Legislativa.
- Lei de Criação do Fundo Estadual de Energia. Tanto a Constituição Estadual quanto a Lei No. 5.350, proposta pelo FPE, contêm a determinação de criação de um Fundo para energia. Assim, o Conselho Estadual de Energia constituiu uma Câmara Técnica para tratar do tema, sendo esta coordenada pela UFAM e tendo a Agência de Fomento do Estado do Amazonas – AFEAM, como relatora. A proposta foi aprovada pela plenária do Conselho e está sob apreciação do executivo estadual para posterior encaminhamento à Assembleia Legislativa.
- Abertura de linha de fomento para projetos de fontes renováveis de energia e eficiência energética.
- Elaboração de Guias para o empoderamento de municípios no tocante à temática energética. O Instituto Energia e Desenvolvimento Sustentável – INEDES sob os auspícios

da WWF-Brasil elaborou os guias que contêm um passo a passo para que os municípios ou estados possam passar de coadjuvantes para protagonistas no cenário energético ajudando a transformar o cenário atual por todos considerado indesejável.

- Apresentação de diretrizes, ao governo do estado, para o Plano Estadual de Transição Energética.

As reuniões do Fórum, que acontecem bimestralmente, são usadas como

oportunidades para disseminar informações sobre temas relevantes e, para tal, são convidados pesquisadores, instituições públicas e empresas privadas para fazer apresentações. As reuniões, a partir da pandemia da covid 19, passaram a ser on line com transmissão pelo canal do CDEAM no YouTube com livre acesso. Todos os documentos gerados e gravações são de livre acesso no site do CDEAM.

É importante ressaltar que o FPE/UFAM inspirou a criação do Fórum de Energias Renováveis do Estado de Roraima.

NOSSAS MARCAS

O CDEAM possui duas logomarcas, uma do próprio Centro e outra do Fórum Permanente de Energia. A seguir apresentase uma breve descrição das marcas.



A marca atual do CDEAM foi desenvolvida pelo prof. Dr. Almir de Souza Pacheco do curso de Design da UFAM, que assim a descreve: o símbolo criado é formado pela junção dos quatro triângulos equiláteros, convergentes para o centro (em referência a primeira palavra da sigla CDEAM) e organizados em dimensões diferentes para tornar clara a sua justaposição, formando, de maneira gestáltica, o desenho de um

raio (descarga elétrica atmosférica), para reforçar a temática central do CDEAM; qual seja, ENERGIA, a qual, embora saibamos existir em abundância na região amazônica, é preciso avançar muito para saber utilizá-la com sabedoria, assim como a energia contida nas descargas elétricas atmosféricas.

Olhando o conjunto dos elementos gráficos, percebe-se ainda a figura de um cata-vento que representa uma forma antiga de usar energia de fonte renovável e que, por sua vez, representa o entendimento de que as lições do passado precisam ser aprendidas para que possamos construir um futuro melhor.

Para potencializar o significado de energia foi utilizada a cor laranja (mistura do amarelo com o vermelho) que transmite força, curiosidade, otimismo, expansão e criatividade, equilibrada pela austeridade e seriedade da cor cinza. A geometria das letras utilizadas foi o principal critério para combinar com o símbolo e denotar precisão e expertise dos projetos e do trabalho desenvolvido pelo CDEAM.



FÓRUM PERMANENTE DE Energia da UFAM

A design Marcella Sarah, egressa do curso de Design da UFAM, é a criadora da marca do FPE/UFAM. A marca é formada por pentágonos, deslocados entre si em cujos vértices há esferas.

Observando os vértices percebe-se a representação de pessoas com os braços estendidos representando UNIÃO (PARCERIAS, estratégia principal para o sucesso das ações do Fórum) e que, por sua vez, significa também FORÇA.

Por sua vez, os pentágonos deslocados entre si representam MOVIMENTO (As políticas públicas são a mola propulsora para movimentar a sociedade em geral, compromisso principal do Fórum).

A união desses dois elementos, FORÇA e MOVIMENTO, do ponto de vista da física, é ENERGIA.

As cores (verde: ambientais; azul: técnico; vermelho: econômico; amarelo: legal; lilás:

social) representam os desafios que o Fórum terá que contemplar em suas ações:

Vale ressaltar que essas são as cores usadas pelos cursos de graduação em cada uma das áreas de conhecimento relativas aos desafios.

A geometria das letras utilizadas foi o principal critério para combinar com o símbolo e denotar correlação com as premissas e compromissos do Fórum.

Deve ser observado que o que se buscou representar nas logomarcas, bem como, as ações desenvolvidas, estão perfeitamente alinhados com os elementos estratégicos do CDEAM, quais sejam:

MISSÃO: Conceber, implementar e apoiar ações disruptivas para personalizar soluções sustentáveis que sejam replicáveis e adaptáveis, visando contribuir com o desenvolvimento socioeconômico sustentável.

VISÃO: Ser reconhecido, em nível internacional, como um Centro de excelência por suas práticas sustentáveis, éticas, equitativas e íntegras.

VALORES: Transparência; Ética; Integridade; Respeito por todas as vidas e as condições para a sua convivência harmoniosa; Conformidade (compliance) e, Cooperação interinstitucional.

AGRADECIMENTOS

Mesmo correndo o risco de esquecer alguém deixamos aqui registrado nossos mais profundos e sinceros agradecimentos aos que contribuíram e que estão contribuindo para dar continuidade à história do Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM, listados a seguir:

Achiles de Araújo Malveira, Adeilson Teixeira de Albuquerque, Adilson de Oliveira, Adriana Coli Pedreira, Adriano Regis da Silva, Afonso Henriques Moreira Santos, Afonso Rabelo, Aldemurpe Oliveira de Barros, Alessandra Mathias, Alessandro Cesar Maruoka Souza, Alia Ghandour, Almir de Souza Pacheco, Alpheu Ortiz de Oliveira, Amanda Carvalho da Silva, Amaury Magalhães Colares, Ana Beatriz Albanez, Ana Carolina Monte Almeida, Ana Cristina Tavares Campelo, Ana Lenize Negreiros dos Santos, Ana Lúcia de Freitas, Ana Socorro Mota de Figueiredo in memoriam, Anderson de Paiva Alves, André Araújo da Silva, André Frazão Teixeira, André Luiz de Oliveira Chaves, Andréa Braga de Araújo, Andreas Günther, Ângela Mari dos Santos Costella, Antônio Barbosa Neto, Antonio do Nascimento Silva Alves, Antônio Germano da Costa Gadelha, Antônio José Inhamus da Silva, Antônio Venâncio Castelo Branco in memoriam, Ariadne Souza Pimentel, Arlem Pinho de Araújo, Armstrong Campelo Batista, Arnaldo Lopes Martins Filho, Arnilson Jorge da Silva Damasceno, Assiz Ramos de Souza, Atlas Augusto Bacellar, Aurélio Calheiros de Melo Júnior, Aureo Albuquerque Matos, Auricélia dos Santos Conserva, Benjamin Cordeiro Costa Júnior, Bernardo José Guilherme

de Aragão, Betsy Eddy Praia Morais, Bianca Amorim Bandeira, Blake A. Butler, Brenda Ananda de Souza Rodrigues, Breno de Souza França, Bruna Vieiralves Matos, Bruno Araújo Cruz, Bruno Carvalho de Farias, Bruno de Oliveira Marciano, Bruno Gomes Rodrigues, Caren Michels, Carla Kazue Nakao Cavaliero, Carliza Bastos Sena, Carlos Alexandre dos Santos Nogueira, Carlos Augusto Duarte Alecrim, Carlos Chesman de Souza Serra, Cédric Ullrich, Celso Evandro Oliveira da Silva, Celso Paulo de Azevedo, Christiane da Silva Barbosa, Cristiane Daliassi Ramos de Souza, Cristiane Lúcia de Freitas, Cristiano Gonçalves Lima, Daniel de Brito Assunção, Daniel de Menezes Azevedo, Danilo de Santana Chui, David G. Victor, Débora Cristina B. Rodrigues in memoriam, Denis de Freitas Castro, Diógenes S. P. Junior, Diogo Jackson Cajueiro Xavier, Edelcílio Marques Barbosa, Edson da Costa Bortoni, Eduardo Souza da Silva, Eliana Aqueveque de Delgado, Elias Santos Souza, Eliomar Passos de Oliveira, Ellen Barbosa de Andrade, Ellen Kellen Bellucio, Emerson da Costa Rios, Emílio Alberto Amaral Soares, Ennio Peres da Silva, Euler Liberato Guimarães, Ewerton Larry Soares Ferreira, Fábio Cesar Pereira Souza, Fábio Cordeiro Lisboa, Fábio de Souza Lima, Fábio Santos e Silva, Felipe França Moraes, Felipe Oliveira de Albuquerque, Felipe Sgarbi, Fernando Antônio dos Santos Caldas, Fernando César Rodrigues Souza, Francisca Lanai Ribeiro Torres, Francisco Lourenço da Silva in memoriam, Francisco Nilo Leão Prado, Gabriel Sanches Di Palma, Gabriela Edwards Almeida, Gerardo Mota Teixeira (*in memoriam*), Gerdeane Lopes da Silva,

Germana Duarte da Costa, Gerson Luan Viana Macedo, Geverson de Souza Oliveira, Ghisleine Raposo Bacellar, Gilberto Martins, Gileno Carli Silva Araújo, Gilmara de Araújo Pereira, Graciete Andrade de Carvalho, Greicy Costa Marques, Gringo Tavares Galina Barbosa, Guarniery Lima de Souza, Gustavo Cunha da Silva Neto, Gustavo Melo Medeiros, Haroldo Carlos da Silva Nunes, Heleno de Jesus, Hélio Oliveira de Souza Júnior, Henrique dos Reis Fernandes Tavares, Henrique Hideo Yoshida, Ícaro Nóbrega de Sousa, Ires de Paula Miranda, Ivanildo Lima Alves dos Santos, Jadson Cristian Rodrigues, Jaime Casanova Soeiro Junior, Jamal da Silva Chaar, Jamil Haddad, Jander Couto da Silva, Jaqueline Pacheco Coimbra, Jardel Vasques Vieira, Jean Machado Maciel da Silva, Jefferson Emílio Maciel da Silva, Jeibe Medeiros da Costa, Jeronimo Ximenes do Prado Neto, João Caldas do Lago Neto, João de Almeida Melo Filho, João Pedro Laund, Joemes de Lima Simas, Jorge de Andrade Filho, José Alberto da Costa Machado, José Antônio Donizete Rossi, José de Castro Correia, José Ferreira Ramos, José Guedes de Oliveira, José Hildo de Oliveira Filho, José Luiz Gonzaga do Nascimento, José Maria Ypiranga de Carvalho, José Miracy de Souza Filho, José Otávio Serrão Eleutério, José Pereira Batista, José Pinto de Farias Filho, José Raimundo Gomes Pereira, José Raimundo Pereira, José Tadeu Diniz Alkemin, Josefran Martins da Silva, Josué Inácio Lopes de Souza, Karen Barbosa de Melo, Karen Lorena Freire Marinho, Karina Maria da Silva Moura, Karla Mazarelo Maciel Pacheco, Katriana Tavares de Freitas, Katyuche Rodrigues da Costa, Kevin Cardenas Belleza, Lana Priscila Lemos Santos, Larissa Monteiro de Azevedo, Lauro Ken-Iti Furuta, Leandro

Aparecido Pocrifka, Leda Mourão Domingos, Leonardo Silveira da Silva, Letícia Oliveira Flores, Lídia Mara Nery Paiva, Liêge Cardoso Castelani, Lindolfo dos Santos Rodrigues Júnior, Lizit Alencar de Costa (*in memoriam*), Lorena Monteiro Siqueira, Lucas Carvalho Cordeiro, Lucas Pinheiro da Silva, Luciana Carvalho Martins, Luciane Aguiar Pinto, Lucielen Nunes Barroso Nascimento, Luís Smith Oliveira de Castro, Luiz Antonio de Oliveira, Luiz Augusto Horta Nogueira, Manoel Fernandes Martins Nogueira, Mara Rúbia Gomes Nogueira, Marcela Sarah Filgueiras de Farias, Marcelo Felipe Mazini dos Santos, Marcelo Girão do Amaral, Marcelo Monteiro da Silva, Marcelo Pinho, Márcia Drumond Sardinha, Márcia Rodrigues de Moraes, Marciléia da Silva Moraes, Marcionilio Brito Batista Filho, Marcionilo Neri da Silva Júnior, Marco Antônio de Freitas Mendonça, Marco Aurélio Nobre Moura, Marco Aurélio Vasconcelos Freitas, Marcos Bandeira Amorim, Marcos Wanderlei Cauper Muniz *in memoriam*, Marcus Vinicius de Vasconcelos Paiva *in memoriam*, Maria da Conceição M. Reis, Maria do Perpétuo Socorro Rodrigues Chaves, Maria Emília de Lima Tostes, Mariana Binda Pereira, Marinez Adativa Ferreira Menezes, Marisol E. de Barros Plácido, Martin Paradine, Matheus de Faria e Cunha Costa, Matheus Figueira de Araújo, Matheus Gonçalves Batista Fonseca, Matheus Leite Motta Lopes, Michael Davilan de Mattos, Michael Golba, Michele Andriolli Custódio, Migdonio Hidalgo Vela, Mônica Marcelly Barbosa da Rocha, Mônica Rodrigues de Souza, Murilo de Mello Martins, Nara Luana Xavier de Silva, Narcizo Martins França, Nazareno de Pina Braga, Neilvaldo de Souza Matos, Nielson Vasconcelos dos Anjos, Nilmar Lins Pimenta, Nilton de Souza Campelo,

Nilton Pereira Silva, Noira Auzier Pereira, Omar Seye, Orlens da Silva Melo, Orsi Cunha, Osaneide Ferreira Crispim in memoriam, Ozeney Souza e Silva, Pablo Carvajal, Paulo Có, Paulo de Barros Correia, Paulo Roberto de Seixas, Pedrina Polli Razotto, Prisciane Cristina Pimentel de Paula, Priscila de Sá Leitão Cunha, Rafael Coutinho Cilento, Rafael Pereira Santos, Rafaelli de Moraes Pereira, Raimundo Nonato Helbing da Costa, Raimundo Pereira de Vasconcelos, Raimundo Ribeiro Passos, Raina Ilana Caranhas Feitoza, Ramid Said da Silva Martins, Rannier Marques Mendonça, Raphael Di Carlo Silva dos Santos, Raquel Pazuello Silva, Rayjoce Rodrigues da Silva, Reike Yasunori Murayama, Rejane Mercia de Moraes Duzat, Renato Mendes Freitas, Rhandssaissem Tavares Leal, Ricardo Aparício Guimarães, Ricardo Bustamante Alkmin, Roberto Cesar de Mendonça Barbosa, Roberto Devieni Filho, Roberto Ferreira de Lima, Rodrigo Augusto da Silva Pimentel, Rosana Cristina Pereira Parente, Rosemery Rocha da Silveira, Rubens Alessandro Seixas, Samir Eid Pessanha, Samuel Brilhante de Alencar, Sandro Dimy Barbosa Bitar, Sarah Hounsell Barros de Carvalho, Sheila Cordeiro Mota, Sheila Furtado Farias, Silvana Rocha de Lima, Silvia Gonçalves Barboza, Silvia Rodrigues Derzi, Sílvio Amorim de Souza, Siomara Vieira Nascimento, Sônia Maria da Silva Carvalho, Spartaco Astolfi Filho, Suzana Maria Ramos da Costa, Thainara Costa da Silva, Thenyson Dewey Moreira, Thiago

Fonseca Vianna, Tiana Kiesslich Fraiji, Tuanny Soares da Silva, Tyler J. Goepfert, Valquiria Porfirio Barbosa, Vanessa de Sá Leitão Cunha, Victor Vellano Neto, Virgínia Mansanares Giacon, Vitor Bacuri Torres, Vonnick de Araújo Pinheiro, Wagner Queiroz Silva, Wedja da Silva Clementino, Wellyghan Assis Silveira Júnior, Whillison Bentes da Costa, Wilison Andson de Souza, Willamy Moreira Frota, Wilson Souza Galvão Júnior, Yanne Katiussy Pereira Gurgel Aum, Yara dos Santos Costa, Yasmine dos Santos Ribeiro Cunha, Yuji Maruoka Júnior, Yurimiler Leyet Ruiz.

Finalizando os agradecimentos deixo o registro de nossa gratidão ao professor doutor Jean Machado, doutora Greice Vaz, professora doutora Larissa Albuquerque de Alencar e as acadêmicas do curso de Design da UFAM, Letícia Lima de Souza e Beatriz Lima Carvalho Araújo, pela arte da capa da revista. Também não poderia deixar o registro de profundo agradecimento à Profa. Dra. Cristiane Daliassi Ramos de Souza, editora-chefe da Revista Energia na Amazônia, e a todos os membros do Comitê Editorial, que aceitaram essa missão de implementar uma ambição antiga de criar um espaço onde a produção científica na área energética, voltada para a problemática amazônica, pudesse ser socializada irrestritamente. Esperamos contar com a colaboração de toda a comunidade acadêmica para perenizar este sonho que se materializa nessa primeira edição.





PRODUÇÃO DE BIOGÁS E SYNGAS A PARTIR DE BIOMASSA RESIDUAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

BIOGAS AND SYNGAS PRODUCTION FROM BIOMASS WASTE TO ENERGY GENERATION

Cristiane Daliassi Ramos de Souza ^{1*}, Rubem Cesar Rodrigues Souza ², Omar Seye ³

¹ Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Manaus, Amazonas. E-mail: cdaliassi@ufam.edu.br

² Universidade Federal do Amazonas, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Eletricidade, Manaus, Amazonas.

³ Universidade Federal da Grande Dourados, Faculdade de Engenharia, Dourados, Mato Grosso do Sul.

Resumo

Para o desenvolvimento do interior do estado do Amazonas torna-se imprescindível o suprimento elétrico a baixo custo com o aproveitamento dos recursos energéticos renováveis disponíveis no local. O uso da biomassa como combustível tem sido bastante investigada e pode ser útil para a geração de eletricidade em pequena escala, como nas comunidades isoladas que não possuem acesso ao sistema interligado nacional, e não contam com outra fonte de energia para a melhoria de suas condições de vida, além de ser uma opção renovável na substituição dos combustíveis fósseis. Nesse contexto, objetivo deste trabalho foi verificar o potencial da produção de biogás a partir do aguapé e o gás de síntese (*syngas*) do carvão das cascas do cupuaçu, sendo avaliada a eficiência de conversão energética de cada processo empregando um motor de combustão interna acoplado a um gerador elétrico. Os experimentos foram divididos em duas etapas, uma para o processo de digestão anaeróbia do aguapé, efetuado em biodigestores rurais tipo indiano e chinês, e a outra etapa para o processo de gaseificação do carvão do cupuaçu. As propriedades físico-químicas e energéticas das biomassas e carvão foram investigadas por diversas técnicas. Os resultados mostraram que o biogás obtido pelo aguapé no biodigestor não foi suficiente para alimentar o gerador. Já o *syngas* apresentou características físico-químicas satisfatórias e uma eficiência global energética de 4,0%, que apesar de baixa, a sua utilização parcial ou em substituição em geradores à diesel são destinados principalmente a eletrificação de pequenas comunidades em regiões isoladas.

Palavras-Chave: Biogás. Gás de síntese. Aguapé. Cupuaçu. Potencial energético.

Abstract

For the development of the interior of the state of Amazonas, low-cost electrical supply is essential, taking advantage of the renewable energy resources available locally. The use of biomass as a fuel has been extensively investigated and can be useful for generating electricity on a small scale, such as in isolated communities that do not have access to the national interconnected system, and do not have another source of energy to improve their conditions of life, in addition to being a renewable option to replace fossil fuels. In this context, the

objective of this work was to verify the potential for biogas production from water hyacinth and *syngas* from cupuaçu shell coal, evaluating the energy conversion efficiency of each process using an internal combustion engine coupled to an electric generator. The experiments were divided into two stages, one for the anaerobic digestion process of water hyacinth, carried out in Indian and Chinese rural biodigesters, and the other stage for the gasification process of cupuaçu coal. The physicochemical and energetic properties of biomass and coal were investigated using different techniques. The results showed that the biogas obtained by the water hyacinth in the biodigester was not enough to power the generator. *Syngas*, on the other hand, presented satisfactory physicochemical characteristics and an overall energy efficiency of 4.0%, which despite being low, its partial use or as a replacement in diesel generators are mainly intended for the electrification of small communities in isolated regions.

Keywords: Biogas. *Syngas*. Water Hyacinth. Cupuaçu. Energy potential.

1. Introdução

O desafio do suprimento elétrico na região Amazônica é histórico, concorrendo vários fatores para essa situação. A compulsoriedade da universalização do serviço de energia elétrica, garantida através da Lei 10.438 de 26 de abril de 2002 (ANEEL, 2002), impõe urgência, para as concessionárias, na superação desse desafio. Por outro lado, para que ocorra um efetivo desenvolvimento do interior do estado do Amazonas, torna imprescindível o suprimento elétrico a baixo custo, com alta confiabilidade e pautado no aproveitamento dos recursos energéticos renováveis disponíveis localmente.

O modelo atual de geração de energia nas pequenas comunidades é feito por meio de termelétricas a óleo diesel, provocando poluição ambiental e gerando altos custos de importação e transporte do combustível para a região. A geração descentralizada de eletricidade a partir de recursos renováveis figura-se como uma alternativa local, viável e sustentável em termos econômicos e ambientais. Nesse contexto, a biomassa apresenta grande potencial de geração de energia de acordo com o processo de conversão, divididos em biológicos e térmicos. Os principais processos biológicos são a fermentação e a digestão anaeróbia, e entre os processos térmicos destacam-se a gaseificação e a pirólise (Bridgwater, 2006). Diante da atual busca por novas fontes energéticas para suprir a crescente demanda mundial por energia, que seja menos agressivas ao ambiente, a utilização da biomassa contribui na mitigação do efeito estufa e no aproveitamento de resíduos agroindustriais (Lora & Andrade, 2009)

Dentre os vários tipos de biomassa existentes no Amazonas destaca-se o fruto do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), uma das mais importantes culturas amazônicas (Figura 1), apresenta endocarpo carnoso (polpa comestível) espesso, possui sabor ácido agradável, cheiro intenso e característico que o torna apreciadíssimo, constituindo-se num produto de exportação sob a forma de suco, doce, compota, sorvete e licor (Freire *et al.*, 2009). Em termos tecnológicos, para aproveitamento energético, utiliza-se a casca do fruto, que além da queima direta tem-se a produção de briquetes e sua posterior gaseificação (Korzenowski *et al.*, 2023).



Figura 1. Cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*), com destaque do fruto (cupuaçu).

Fonte: Istockphoto (2024).

A produção e consumo de briquetes de carvão da casca do cupuaçu já estão consolidados nos Estados Unidos e em alguns países da Europa que já possuem um mercado específico para esses combustíveis, bem como para alguns países do sudeste asiático que produzem briquetes de resíduos agroflorestais em escala industrial (Ajav; Singh; Bhattacharya, 1999). No Brasil a situação é favorável devido às grandes quantidades desses resíduos que são desperdiçados anualmente e que processados (compactação) poderiam competir no mercado com combustíveis semelhantes.

Outra biomassa abundante na região amazônica é o aguapé (*Eichhornia crassipes*), também conhecido como jacinto-de-água, baronesa, mururé, pavoá e camalote. É uma planta macrófita da família das *Pontaderiaceae*, possui flores roxas e ocorre geralmente em nascentes eutrofizadas, muito comum em regiões de clima equatorial, subtropical e tropical e apresenta um ciclo de vida perene (Figura 2).



Figura 2. Proliferação do Aguapé (*Eichhornia crassipes*) em uma lagoa, destaque para a flor.

Fonte: Istockphoto (2024).

O aguapé é considerada uma planta bastante útil em lagoas de tratamento de efluentes por funcionar como um autêntico filtro biológico, pois suas raízes retêm impurezas contidas na água e, quando se decompõem pela ação de microrganismos, servem de nutrientes para a planta. Entretanto, em algumas situações de superpopulação, o aguapé pode se tornar um problema, pois corpos hídricos com presença excessiva de nutrientes como o Nitrogênio (N), Fósforo (P) e o Potássio (K), são favoráveis ao crescimento dessas plantas, desenvolvendo-se rapidamente. Diversos estudos têm sido relatados utilizando o aguapé (*Eichhornia crassipes*) na produção de biogás (Njogu *et al.*, 2015; Nam, Cong e Thao, 2023).

Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar o aproveitamento das biomassas aguapé e casca do cupuaçu como matéria-prima na produção de biogás e *syngas*, respectivamente, buscando valorizar esses resíduos lignocelulósicos. O trabalho também contém estudos de avaliação e comparação das eficiências na geração de energia utilizando um motor de combustão interna.

2. Metodologia

O procedimento experimental foi dividido em duas partes: obtenção do biogás por digestão anaeróbia do aguapé utilizando biodigestor indiano e chinês; e obtenção do *syngas* por gaseificação do carvão da casca do cupuaçu.

2.1 Obtenção de biogás pelo processo de digestão anaeróbia do aguapé utilizando biodigestores indiano e chinês

A coleta do aguapé foi realizada nos tanques da Estação de Preservação de Mamíferos e Quelônios Aquáticos da empresa de energia de Manaus. A mistura alimentada no biodigestor indiano foi preparada através da trituração do aguapé, adição de água na proporção 1:2,5 (aguapé:água) e adição de 1% em peso (relativo à biomassa) de hidróxido de sódio (NaOH). A mistura foi deixada por um período de incubação de quatro dias para promover a hidrólise parcial do material lignocelulósico. Após sete dias da primeira alimentação, foi realizada uma segunda alimentação com a mistura aquosa de aguapé igualmente proporcional à primeira, mas não hidrolisado. Desta forma, efetuou-se o fechamento do biodigestor indiano, para promover a biodigestão.

Para o biodigestor chinês, a mistura alimentada foi preparada através do aguapé triturado, esterco bovino e água nas proporções 1:0,5 (aguapé:esterco) e 1:1 (aguapé:água). O aguapé foi pré-hidrolisado com adição de 0,6% em peso (relativo à biomassa) de NaOH, deixada por um período de incubação de seis dias. As condições ambientais na Fazenda Experimental do Centro

de Desenvolvimento Energético Amazônico (CDEAM) foram de constantes chuvas e temperaturas entre 25°C e 30°C.

As misturas preparadas foram caracterizadas através das determinações de teor de sólidos totais (TST), teor de sólidos voláteis (TSV), potencial hidrogeniônico (pH) nas condições de alimentação dos biodigestores (afluente) e nas condições após a biodigestão (efluente), que proporcionarão a determinação da taxa de biodegradação de sólidos e a eficiência do biodigestor. Foi determinado também o teor de lignina e celulose, teor de cinzas totais, análise imediata, análise elementar e poder calorífico da biomassa desidratada, para a investigação da utilização para fins energéticos.

2.2 Obtenção de syngas pelo processo de gaseificação do carvão da casca do cupuaçu

A coleta das cascas do cupuaçu foi realizada na Unidade de Despulpamento da Cooperativa Agroindustrial de Produtos do Projeto Uatumã, assessorada pela Secretaria de Produção Agrícola do município de Presidente Figueiredo-AM. Foram coletadas aleatoriamente cascas de frutos recém-despolpados, em sacos de ráfia de 30 kg e transportadas para o laboratório de Carvão Vegetal e Celulose do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), onde foram quebradas em pedaços menores, seguida de secagem ao ar por 48 h e posteriormente em estufa por 24 h.

O carvão das cascas do cupuaçu foi obtido pela carbonização da biomassa previamente seca em estufa, utilizando uma retorta em aço, contendo sistemas de controle de pressão e eliminação de gases de decomposição da matéria orgânica e de recuperação dos gases condensáveis, além de um forno mufla circular, que faz o aquecimento da retorta. A biomassa *in natura* sofreu um processo térmico até 460°C durante 1 h, seguido de resfriamento ao ar e armazenada em sacos plásticos. Este processo foi realizado no Laboratório do INPA.

O carvão obtido foi triturado utilizando o protótipo de briquetadeira compacta, de propriedade do CDEAM. Foi preparado um ligante à base de fécula de mandioca polimerizada em água quente, na proporção 1:7 (ligante:água). Em seguida, o carvão triturado foi misturado ao ligante, na proporção 1:0,56 (carvão:ligante), utilizando um misturador mecânico e levado a briquetadeira, onde foi prensado em forma de briquetes tipo almofadas. Os briquetes úmidos foram pesados e levados à estufa para secagem a 110°C por 24 h. Após a secagem, os briquetes foram pesados novamente e embalados após o resfriamento.

As cascas, o carvão e os briquetes de cupuaçu foram submetidos a ensaios para a determinação de suas características físico-químicas. As composições químicas elementares

no Laboratório de Ressonância Magnética Nuclear e Análise Elementar, do Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos (DQ/UFSCar). O poder calorífico superior (PCS) foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica isotérmica (Parr 1341), de acordo com a norma NBR 8628. A análise imediata foi determinada de acordo com a norma NBR 8112. A análise do teor de lignina foi realizada no DQ/UFSCar, utilizando o método descrito por Kristin *et al.* (2020) e norma ASTM D1104. A massa específica aparente a granel e real foram determinadas pela norma NBR 8112, nos laboratórios do CDEAM/UFAM.

Os testes para obtenção do combustível gasoso por gaseificação (*syngas*) foram realizados com os briquetes do carvão da casca do cupuaçu, monitorando os parâmetros de natureza ambientais através de um analisador de gases (*EcoLine 6000* da *Eurotron instruments*), e os elétricos a partir de um analisador de energia (*ET-5000/5050* da *Minipa*), visando avaliar a eficiência energética do sistema de geração de eletricidade (gaseificador/motor de combustão interna/gerador elétrico), assim como a qualidade do *syngas* gerado para alimentar o motor e a composição dos gases de escape, conforme mostra a Figura 3. Para tanto foram utilizados como carga (gerador), um conjunto de 25 lâmpadas de 200 W, resultando numa carga de 5 KW, montada sob uma bancada existente no local.

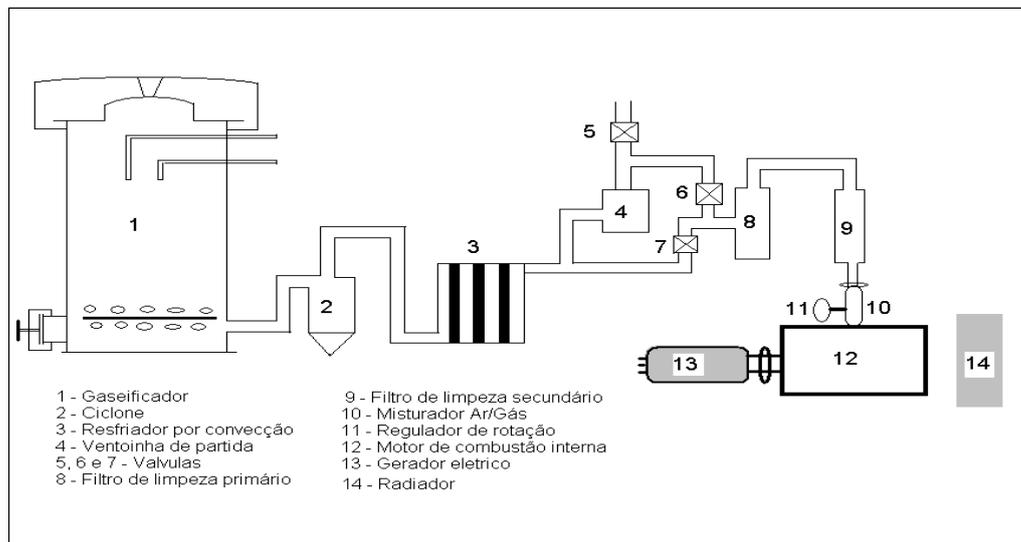


Figura 3. Sistema de obtenção do *syngas* (gaseificador) e geração de eletricidade (motor de combustão interna/gerador elétrico).

Fonte: Autores (2024).

O carregamento com os briquetes do carvão da casca do cupuaçu é realizado pelo topo do gaseificador sendo a tampa de carregamento fixada por uma lâmina de aço maleável, que

tem também o papel de válvula de segurança, para alívio da pressão em caso de explosões internas do gás. Para o recolhimento do pó arrastado pelos gases, um ciclone permite a separação da fração de maior granulométrica. O gás ao sair do ciclone passa por um trocador de calor tubular, de convecção natural, com o gás fluindo pelos tubos, antes de ser encaminhado aos filtros de limpeza primário e secundário e a seguir é introduzido no motor.

3. Resultados e Discussão

As análises realizadas na caracterização físico-química da biomassa, aguapé, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização físico-química da biomassa aguapé (*Eichhornia crassipes*).

Análises	Aguapé	
TST (%)	4,17	
TSV (%)	81,81	
Umidade (%)	95,83	
Lignina (%)	26,23	
PCS (MJ/kg, base seca)	13,90	
Massa específica (kg/m ³)	Real	nd
	Aparente a granel	115,1
Análise Imediata (%, base seca)	Materiais Voláteis	62,86
	Carbono Fixo	18,95
	Cinzas	18,19
Análise Elementar (%)	C	37,792
	H	4,643
	N	1,522
	S	0,200
	O	37,653
	Cinzas Totais	18,19

nd: não determinado

Fonte: Autores (2024).

O TST obtido foi inferior aos valores divulgados na literatura por León *et al.* (2021) e Soeprijanto *et al.* (2021), entre 12,3% e 17,5%, porque é referente a plantas jovens, o que justifica o menor conteúdo de sólidos. O TSV obtido foi próximo, entre 70,0% e 88,9%, correspondendo a um material lignocelulósico. O teor de cinzas foi expressivo, porém dentro dos limites apresentados pelas referências (entre 11,1% e 22,7%). Esse valor é justificado pelo fato de o aguapé ser cultivado em tanques de criação de animais aquáticos e ser adubado com substâncias contendo minerais como sódio e potássio.

Observa-se também pela Tabela 1 que o aguapé desidratado apresenta baixo teor de carbono elementar e elevado teor de cinzas totais, que resulta no moderado poder calorífico superior (PCS), similar ao encontrado no trabalho de Sricoth *et al.* (2017). O que impede o aguapé de se tornar um combustível é a elevada quantidade de água (~ 96%), cuja remoção não é viável do ponto de vista econômico. Quanto ao resultado do teor de lignina pode ser observado um valor bastante elevado. Vale ressaltar que a lignina é de difícil degradação pelos microrganismos anaeróbios, desse modo, sua expressiva quantidade dificultaram a obtenção do biogás, ocasionando um maior tempo de retenção hidráulica no biodigestor.

3.1 Digestão anaeróbia do aguapé no biodigestor indiano

Foram necessários 30 dias de incubação para o início da liberação do biogás. O tempo de retenção hidráulica da biomassa foi de 60 dias (intervalo entre a alimentação e o final do processo). Para avaliar a degradação do aguapé e, conseqüentemente, a eficiência do biodigestor, foram coletadas amostras, e determinados os teores de sólidos totais (TST) e voláteis (TSV) da mistura alimentada e do lodo resultante do processo (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros do processo de digestão anaeróbia do Aguapé no biodigestor indiano.

Análises	Afluente	Efluente
TST (%)	5,92	3,82
TSV (%)	5,40	2,18
pH	7,0	6,8
Eficiência (%)	59,63%	

Fonte: Autores (2024).

Os valores do pH estão de acordo com o processo de biodigestão, que devem iniciar neutro e terminar próximo da neutralidade, devido à etapa de metanogênese requerer pH neutro para se desenvolver. Analisando os valores de TST e TSV, pode-se afirmar que ocorreu a biodigestão do aguapé e, conseqüentemente, a formação do biogás como detectado pelo gasômetro. Já eficiência do biodigestor foi de 59,63%, calculada para o tempo de retenção de 60 dias e um volume útil do biodigestor de 2,36 m³.

Esse valor é satisfatório para o biodigestor indiano, que possui uma tecnologia bastante simples, o que limita a eficiência do processo de biodigestão. A quantidade de biogás produzida e detectada pelo gasômetro foi de 0,24 m³, sendo considerada pequena. Desse modo, foram realizados

cálculos para se determinar a quantidade de biogás produzido, considerando a eficiência do processo e os teores de sólidos totais e voláteis obtidos experimentalmente.

A mistura biodegradável foi preparada com 240 kg de aguapé (picada contendo raiz e folhas), 13,8 kg de esterco bovino como inóculo e 60 kg de água potável, cujo teor de sólidos voláteis da mistura foi de 5,40%. Assim, a quantidade de sólidos voláteis no afluente foi de 13,71 kg. Devido à eficiência do processo de 59,63%, a massa de matéria orgânica biodegradada foi de 8,17 kg.

De uma forma geral, é aceito que a produção de biogás a partir do aguapé seja ao redor de 0,15 m³/kg de sólidos voláteis. Assim, foi estimada uma produção de 1,23 m³ de biogás, de acordo com os resultados experimentais, muito superior ao detectado pelo gasômetro. Quando o processo de digestão anaeróbia foi encerrado e o biodigestor foi aberto, para se efetuar a coleta de amostra para análise do material efluente (Figura 4A), foi observada a formação de uma camada espessa e rígida na superfície, composta pelo aguapé, e uma camada inferior formada por líquidos, conforme mostra a Figura 4B.



Figura 4. Abertura do biodigestor indiano após o processo de digestão anaeróbia do aguapé.

Fonte: Autores (2024).

Em testes de laboratório foi observado que o aguapé se degrada mesmo sem adição de água, o que explica sua degradação no biodigestor indiano. Esse problema ocorre, porque o aguapé apresenta baixa massa específica e, na superfície, se degrada formando essa “crosta”, uma vez que o biodigestor não tem um sistema de agitação. Essa barreira formada pelo aguapé, na superfície, dificulta a liberação do biogás formado, desse modo, grande parte do biogás foi eliminado de forma lenta e com fluxo inferior ao limite de detecção do gasômetro.

Nos dias que compreenderam os finais de semana, em que o biogás não foi esgotado, acumulou-se uma quantidade suficiente para ser registrado pelo gasômetro ao ser esgotado no

primeiro dia útil da semana. Isso explica por que houve degradação de biomassa e formação de biogás. Diante disso, pode-se concluir que o processo no biodigestor indiano não é aconselhável, devido à segregação da mistura, com aumento do tempo de retenção da biomassa e baixa produtividade do biogás. A digestão anaeróbia do aguapé também é desaconselhável devido à baixa massa específica e baixo teor de sólidos voláteis, que resulta na necessidade de grandes volumes do biodigestor para pouco biogás produzido. Observa-se nesse experimento que para a produção de 1,23 m³ de biogás (em 60 dias) foram necessários 240 kg de aguapé.

3.2 Digestão anaeróbia do aguapé no biodigestor chinês

Após 70 dias do processo de digestão anaeróbia, o biodigestor chinês foi aberto e coletadas amostras para a avaliação do processo. Observou-se a presença de uma camada superficial rígida que, ao ser rompida, deixou evoluir bolhas de gás, bem como a presença do aguapé não degradado. Nas amostras coletadas foram determinados os TST e TSV da mistura alimentada (afluente) e do lodo resultante (efluente) do processo, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros do processo de digestão anaeróbia do Aguapé no biodigestor chinês.

Análises	1:0,5 aguapé/esterco	
	1:1 biomassa/água	
	afluente	efluente
TST (%)	6,99	6,36
TSV (%)	4,50	4,09
pH	7,8	7,12
Eficiência (%)	9,1%	

Fonte: Autores (2024).

A eficiência do processo foi determinada através da redução do teor de sólidos voláteis na mistura durante o período de permanência no biodigestor. Pode-se atribuir a pequena eficiência do processo de digestão anaeróbia do aguapé às suas características físico-químicas, principalmente a baixa massa específica, responsável pela segregação dos componentes da mistura que dificulta a fermentação, uma vez que os grupos de bactérias precisam estar em contato com a biomassa, o esterco e a água, simultaneamente, para promover as reações de síntese do biogás.

O aguapé utilizado constituiu de plantas inteiras contendo as raízes, isso pode ter contribuído para a diminuição da eficiência, uma vez que são compostas por elevado teor de lignina, pouco degradável pelos microrganismos. A performance do biodigestor chinês utilizando aguapé foi muito limitada, por se tratar de um equipamento muito rústico, sem

sistema de agitação ou qualquer outro dispositivo que possa melhorar o contato entre os componentes da mistura.

A quantidade de biogás produzido não foi suficiente para ser detectada pelo gasômetro, devido à pequena quantidade formada, confirmada pela quantidade de sólidos voláteis degradada, bem como pela barreira formada pela camada superficial no biodigestor. Não foi possível avaliar a qualidade do biogás formado, uma vez que o processo apresentou baixa eficiência e a pequena quantidade coletada nos testes apresentou-se saturada de água, o que reflete na inviabilidade para o uso energético.

3.3 Gaseificação dos briquetes do carvão da casca do cupuaçu

O rendimento gravimétrico da carbonização das cascas secas é apresentado na Tabela 4. O processo foi considerado satisfatório, com baixa produção de alcatrão. Destaca-se a quantidade de gases leves que são queimados no *flare* da retorta, se existisse um processo integrado, seria possível a utilização desses gases para gerar energia.

Tabela 4. Rendimento gravimétrico da carbonização da casca do cupuaçu.

Temperatura Máxima (°C)	Carvão (%)	Líquido Pirolenhoso (%)	Alcatrão (%)	Água (%)	Gases Leves (%)
460	31,67	28,17	9,23	14,21	16,72

Fonte: Autores (2024).

Em seguida, foi realizado o processo de briquetagem do carvão das cascas do cupuaçu. O rendimento gravimétrico foi de 99,3%, sendo considerado excelente, com baixa perda de material, uma vez que o resíduo de uma batelada de briquetagem é aproveitado em outra batelada. O consumo do ligante foi de 70 g/kg de carvão. A Figura 5 mostra a geometria do tipo almofada obtida dos briquetes após o processo de briquetagem.



Figura 5. Briquetes do carvão da casca do cupuaçu.

Fonte: Autores (2024).

A qualidade do carvão obtido foi avaliada através das análises imediata, elementar e potencial calorífico (Tabela 5). Pela análise elementar observou-se um pronunciado teor de carbono e baixo teor de oxigênio, que refletem no poder calorífico superior elevado. O baixo teor de nitrogênio e a ausência de enxofre, que são elementos formadores de gases tóxicos, demonstram o benefício ambiental da utilização desse combustível.

Tabela 5. Características físico-químicas e elementar dos briquetes e das cascas de cupuaçu.

Amostras	Cascas <i>in natura</i>	Carvão	Briquete	Ref 1
Análise Elementar (% em peso)	C	43,71	-	73,95
	H	5,55	-	2,66
	O	44,49	-	11,81
	N	0,25	-	0,18
	S	nd	-	nd
	Cinzas	6,00	-	11,40
PCS (MJ/kg, base seca)	18,58	26,54	27,13	
Umidade (%)	13,37	9,09	5,39	
Análise Imediata (% em base seca)	Materiais Voláteis	75,45	14,41	20,93
	Cinzas	6,0	12,06	11,40
	Carbono Fixo	18,55	73,53	67,67
Massa Específica (kg/m ³)	Real			
	Aparente a Granel			

nd: não determinada

Fonte: Autores (2024).

A casca do cupuaçu *in natura* possui um PCS adequado ao uso energético, porém, apresenta elevado teor de materiais voláteis, o que impede a utilização como combustível em equipamentos que não recupere ou carbonize o líquido pirolenhoso e o alcatrão. Além disso, apresenta baixa massa específica, sendo necessária a compactação, para tornar o processo mais eficiente e econômico. Os briquetes apresentam o teor de carbono fixo um pouco inferior e o teor de material volátil maior que o do carvão das cascas de cupuaçu, devido à presença de material *in natura*, constituinte do ligante.

As cascas de cupuaçu, quando carbonizadas, resultam em carvão vegetal com conteúdo energético 43% superior ao da casca *in natura*. Porém, a baixa densidade do carvão constitui em um obstáculo ao processo de gaseificação, por isso, a realização da briquetagem como forma de adensamento de matéria e energia é promovida como uma solução para o aproveitamento desse resíduo. A perda de massa por abrasão dos briquetes foi de 7,79%, indicando a excelente

resistência mecânica, quando comparada com o valor médio de 14,0% referentes a briquetes conformados em alta pressão e temperatura.

3.3.1 Teste do syngas no sistema de geração de energia

Durante a fase de testes foram realizadas medições dos parâmetros operacionais necessários para uma avaliação energética do sistema apresentado na Figura 3 anteriormente. Com bases nestas medições elaborou-se um balanço de massa e energia cujos resultados são mostrados na Tabela 6, juntamente com os principais parâmetros operacionais.

Tabela 6. Principais parâmetros do sistema de gaseificação/geração de energia.

Parâmetros medidos	Valores
Carga atendida (kW)	7,0
Energia elétrica gerada (kWh)	7,0
Consumo de carvão (kg/h)	23,0
Composição química do <i>syngas</i> (mg/kWh)	NO = 65; NO ₂ = 0; SO ₂ = 314; CH ₄ = 3,81; CO = 9977
Composição do gás de escape (mg/kWh)	NO = 358; NO ₂ = 0; SO ₂ = 0; CH ₄ = 0,1; CO = 11906
Parâmetros deduzidos	Valores
Consumo específico de combustível (kg/kWh)	3,28
Energia de entrada no gaseificador (kWh)	173,33
Eficiência energética global (%)	4,0

Verifica-se que para uma energia de entrada no gaseificador de 173,33 kWh, através dos briquetes do carvão de cupuaçu, obteve-se uma energia útil de 7 kWh (energia elétrica gerada), o que resulta em uma eficiência energética global de 4,0%. Este resultado indica uma eficiência energética global relativamente baixa quando comparada com a faixa de eficiência de sistemas equivalentes utilizando com insumo energético carvão vegetal de lenha.

O consumo específico de gaseificadores de pequena potência a carvão vegetal, acionando motores de combustão interna, de acordo com a literatura (Kühl; Oliveira, 2019), situa-se na faixa de 1,0 a 1,8 kg de carvão/kWh. Tais gaseificadores, normalmente na faixa de 1,0 a 1,5 kg de carvão/kWh, apresentam eficiência energética global na faixa de 8,0 a 12,0%. Ainda com relação a eficiência global de conversão da energia contida nos briquetes em energia elétrica,

deve-se anotar o alto teor de cinza presente nos briquetes (11,40%) enquanto para material lenhoso como o eucalipto o teor de cinzas fica em torno de 1,0%.

4. Conclusões

Os resultados do processo de digestão anaeróbia do aguapé não foram satisfatórios para os biodigestores indiano e chinês, portanto recomenda-se o estudo dessa biomassa em outros tipos de biodigestores. Já o processo de gaseificação utilizando briquetes do carvão das cascas do cupuaçu produziu um gás de síntese (*syngas*) com características físico-químicas aceitáveis e obteve eficiência global energética de 4,0%, considerada baixa, mas a sua utilização parcial ou total em geradores à diesel são destinados principalmente a eletrificação de pequenas comunidades em regiões isoladas, onde é enorme a dificuldade, custo e logística para aquisição do óleo diesel.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da empresa concessionária de energia do Amazonas.

6. Referências

- Ajav, E. A.; Singh, B.; Bhattacharya, T. K. Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel. **Fuel**, v. 17, p. 357-365, 1999.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/2002/L10438.htm. Acessado em dezembro/2023.
- Bridgwater, T. Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1755-1768, 2006.
- Freire, M. T. A.; Petrus, R. R.; Freire, C. M. A.; Oliveira, C. A. F.; Felipe, A. M. P. F.; Gatti, J. B. Caracterização físico-química, microbiológica e sensorial de polpa de cupuaçu congelada (*Theobroma grandiflorum* Schum). **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 12, n. 1, p. 9-16, 2009.
- Frigo, K. D. A.; Feiden, A.; Galant, N. B.; Santos, R. F.; Mari, A. G.; Frigo, E. P. Biodigestores: seus modelos e aplicações. **Acta Iguazu**, v. 4, n. 1, p. 57-65, 2015.
- Istockphoto. **Imagens e ilustrações**. 2024. Disponível em: <https://www.istockphoto.com/br/foto/flor-de-flor-de-jacinto-de-%C3%A1gua-em-lagoa-gm1318578546-405664012>
- Korzenowski, C.; Souza, C. B. S.; Agüero, R. R.; Santos, M. G. Reaproveitamento de cascas de cupuaçu para a produção de energia através da sua transformação em briquetes. **International Seven Journal of Multidisciplinary**, v. 2, n. 2, p. 189-220, 2023.

-
- Kristin, O.; Ilkka, H.; Yrjo, S. Hydrogen Enhanced Bio-fuels for Transport via Fast Pyrolysis of Biomass: A Conceptual Assessment. **Energy**, v. 199, p. 117337, 2020.
- Kühl, R. M.; Oliveira, G. M. T. S. Análises da viabilidade econômica da gaseificação de caroço de açaí no restaurante universitário da universidade federal rural da amazônia. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 25994-26011, 2019.
- León, L. A. R.; Diez, P. Q.; Gálvez, L. R. T.; Perea, L. A.; Barragán, C. A. L.; Rodríguez, C. A. G.; León, A. R. Biochemical methane potential of water hyacinth and the organic fraction of municipal solid waste using leachate from Mexico City's Bordo Poniente composting plant as inoculum. **Fuel**, v. 285, p. 119132, 2021.
- Lora, E. S.; Andrade, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 777-788, 2009.
- Nam, T. S.; Cong, N. V.; Thao, H. V. Enhancing renewable energy production from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) by a biogas-aerating recirculation system: A case study in the Vietnamese Mekong Delta. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 7, p. 100340, 2023.
- Njogu, P.; Kinyua, R.; Muthoni, P.; Nemoto, Y. Biogas production using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) for electricity generation in Kenya. **Energy and Power Engineering**, v. 7, p. 209-216, 2015.
- Soeprijanto, S.; Warmadewanthi, Id, A. A.; Muntini, M. S.; Anzip, A. The Utilization of Water Hyacinth for Biogas Production in a Plug Flow Anaerobic Digester. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 10, n. 1, p. 27-35, 2021.
- Sricoth, T.; Meeinkuirt, W.; Pichtel, J.; Taeprayoon, P.; Saengwilai, P. Synergistic phytoremediation of waste water by two aquatic plants (*Typha angustifolia* and *Eichhornia crassipes*) and potential as biomass fuel. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 5344-5358, 2017.



**CONCEPÇÃO, DESENVOLVIMENTO E DIFUSÃO DE FOGÕES A LENHA E
FORNOS DE FARINHA DE QUEIMA LIMPA NA AMAZÔNIA – UMA ANÁLISE
CRÍTICA**

***CONCEPTUALIZATION, DEVELOPMENT AND DIFFUSION OF CLEAN
COMBUSTION WOODBURNING STOVES AND MANIOC FLOUR FURNACES IN
AMAZON- A CRITICAL ANALYSIS***

Gilberto Martins

Universidade Federal do ABC – UFABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências
Sociais Aplicadas - CECS, Santo André/SP, Brasil. gilberto.martins@ufabc.edu.br

Resumo

Esse artigo relata o desenvolvimento de três projetos de pesquisa executados pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM) com apoio de outros órgãos de fomento entre 1992 e 2006 que procuraram adaptar o princípio de queima invertida para fogões a lenha e fornos de farinha de forma participativa com os usuários e utilizando recursos humanos, materiais e conhecimentos locais das comunidades amazônicas. Tanto o fogão a lenha com o forno de farinha desenvolvidos apresentaram desempenho superior aos tradicionalmente utilizado pelas comunidades em diversos aspectos considerados como o energético, pela maior eficiência, o ambiental, pela menor emissão de gases nocivos e o de conforto do usuário, pela ergonomia e condições térmicas mais apropriadas durante a operação. A estratégia utilizada para a difusão dessas novas tecnologias, entretanto, mostrou-se pouco efetiva, observando-se os resultados obtidos. São propostas, finalmente novas estratégias e políticas públicas para superar os problemas detectados e propiciar uma maior independência energética, sustentabilidade e qualidade de vida para essas comunidades.

Palavras-Chave: Queima invertida. Difusão de tecnologias apropriadas. Eficiência energética. Qualidade do ar em ambientes.

Abstract

This paper reports the development of three research projects carried out by the Federal University of Amazonas supported by other funding agencies between 1992 and 2006 which objectives were to adapt the downdraft combustion concept to woodburning stoves and manioc flour ovens with the active participation of the community users and employing local human, material and knowledge resources of the amazon communities. Both the woodburning stove and the manioc flour oven developed presented superior performance to those traditionally used by the communities regarding the various aspects considered such as energetic, due to the higher efficiency, environmental, due to the lower emission of harmful gases and also the improved thermal comfort to the user during the operation. The strategy used to disseminate these new technologies, however, proved to be ineffective, considering the results obtained. Finally, new strategies and public policies are proposed to overcome the detected problems and provide greater energy independence, sustainability and life quality for these communities.

Martins G., Rev. Energia Am., Manaus, v. 01, n. 01, jan-jun, 2024.

Keywords: Downdraft combustion. Appropriate technology diffusion. Energy efficiency. Indoor air quality.

1. Introdução

Esse trabalho procura fazer um relato sucinto de um conjunto de projetos realizados entre janeiro de 1992 e outubro de 2006 visando avaliar as demandas energéticas de uso final nas comunidades isoladas no estado do Amazonas, as condições de suprimento dessas a partir das tecnologias disponíveis e a proposição e implementação de tecnologias que permitissem uma maior independência energética e sustentabilidade através do uso de recursos energéticos locais, com foco no uso de fogões a lenha de queima limpa para atendimento das demandas domésticas de cocção.

As comunidades isoladas na Amazônia, sofriam à época (e ainda hoje) de uma pobreza energética, que as tornavam dependentes das condições de navegabilidade da rede fluvial para o suprimento de GLP e diesel, sendo que este último também dependia da boa vontade das lideranças políticas municipais (para a geração de eletricidade de forma intermitente e com baixa confiabilidade). A utilização da lenha, mesmo disponível localmente, era e continua sendo realizada em equipamentos de baixíssima eficiência, alta emissão de poluentes e condições de operação insalubres.

Essa situação foi diagnosticada em uma primeira visita às comunidades de Mocambo e Cabury, no município de Parintins, realizada em abril de 1992, entretanto a situação de penúria em relação ao suprimento não só de energéticos, mas de uma forma mais geral foi amplamente divulgada durante a seca de 2023, que isolou diversas comunidades em função dos baixos níveis dos rios, utilizados para o transporte de mercadorias e pessoas.

Partiu-se de um conceito de queimador de lenha em fluxo co-corrente ao fluxo de ar que foi proposta por pesquisadores do Woodburnig Stove Group da Universidade Tecnológica de Eindhoven, sob coordenação do prof. K Krishna Prasad (Prasad & Verharart, 1987; Hasan *et al.*, 1989) no final dos anos 1980. Neste princípio de queima invertida a chama ocorre no sentido de cima para baixo em relação à grelha devido a tiragem obtida por uma chaminé estrategicamente posicionada. Isto faz com que o ar e os voláteis gerados pelo aquecimento da lenha passem por uma região de elevadas temperaturas (as brasas sobre a grelha) fornecendo tempo e temperaturas suficientes para a que as reações de combustão de completem. Estas condições permitem a obtenção de temperaturas mais elevadas nos gases de combustão (em torno de 700°C) e reduzem sua concentração de monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados, que são altamente prejudiciais à saúde (Borges, 1994).

O objetivo desse artigo é relatar um conjunto projetos desenvolvidos neste período visando adaptar o princípio de queima invertida para fogões domésticos e fornos de farinha, procurando atender as demandas energéticas das comunidades isoladas no estado do Amazonas utilizando recursos humanos, materiais e energéticos locais de forma a garantir uma melhor qualidade de vida, resiliência e sustentabilidade dessas comunidades e analisar criticamente a estratégia de disseminação dos equipamentos desenvolvidos.

2. Materiais e Métodos

O relato será baseado em relatórios de pesquisa, relatórios de viagem, artigos publicados e outros documentos produzidos no período em questão, procurando apresentar os desenvolvimentos realizados, os sucessos e fracassos obtidos além de apontar possíveis novas abordagens para a solução de um problema ainda existente.

3. Resultados e Discussão

3.1 Relato do desenvolvimento dos projetos

3.1.a Primeira fase: janeiro a julho de 1992

O convênio existente entre o Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP e a Faculdade de Tecnologia (FT) da UFAM visando a capacitação de seus docentes nessa área viabilizou o início das pesquisas relatadas nesse artigo.

Atuando como professor visitante no Departamento de Eletricidade no período de janeiro a julho de 1992, foi possível desenvolver a proposta e execução de projetos de pesquisa e extensão ligados ao desenvolvimento de um protótipo de fogão a lenha incorporando o princípio de queima invertida, utilizando materiais locais e técnicas desenvolvidas pelas populações tradicionais e adaptado às demandas da região.

Para isso foi construído o primeiro queimador em chapa de aço carbono nas oficinas do Campus de Manaus da UFAM e realizados os primeiros testes de queima nos laboratórios da FT, validando seu desempenho. As temperaturas mais baixas obtidas, entretanto, de no máximo 550°C, indicaram que o aço carbono sem isolamento não era o material adequado para a construção do queimador. Mesmo assim era possível demonstrar com esse protótipo o conceito de queima invertida.

A primeira visita às comunidades de Caburí (Agrovila de São Sebastião) e Mocambo (Agrovila de São João), no município de Parintins, onde a UFAM já dispunha de uma infraestrutura de apoio da

Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) utilizada pela disciplina de Internato Rural do curso de Medicina, foi realizada em abril de 1992. Durante esta visita foi realizado um levantamento do perfil de consumo, hábitos e padrões de utilização de lenha, carvão vegetal, GLP e eletricidade em cerca de 10% dos domicílios de cada vila, que possuíam à época cerca de 2500 habitantes cada (Martins *et al.*, 1992a).

Este levantamento demonstrou que cerca de 24% dos domicílios possuíam apenas fogão a lenha e 62% possuíam fogões a gás, além do fogão a lenha. Nesses últimos o fogão a gás era utilizado apenas para preparar o café da manhã, enquanto o fogão a lenha era utilizado para a preparação das refeições principais, almoço e jantar, em função do alto custo do botijão de GLP e da dificuldade logística de reposição do mesmo.

Também durante esta visita foram realizadas demonstrações do desempenho do queimador no centro comunitário de ambas as vilas. A receptividade e entusiasmo das comunidades foi grande. Durante essas interações, várias ideias de adaptação desse princípio de queima para um fogão foram propostas e foi relatada a existência de argila de boa qualidade e artesãs que produziam painéis e fogareiros a carvão em argila aditivada com a cinza da casca de uma árvore local (*licania apetala*), conhecida como caraipé. A Figura 1 mostra a apresentação do queimador no centro comunitário de uma das agrovilas.

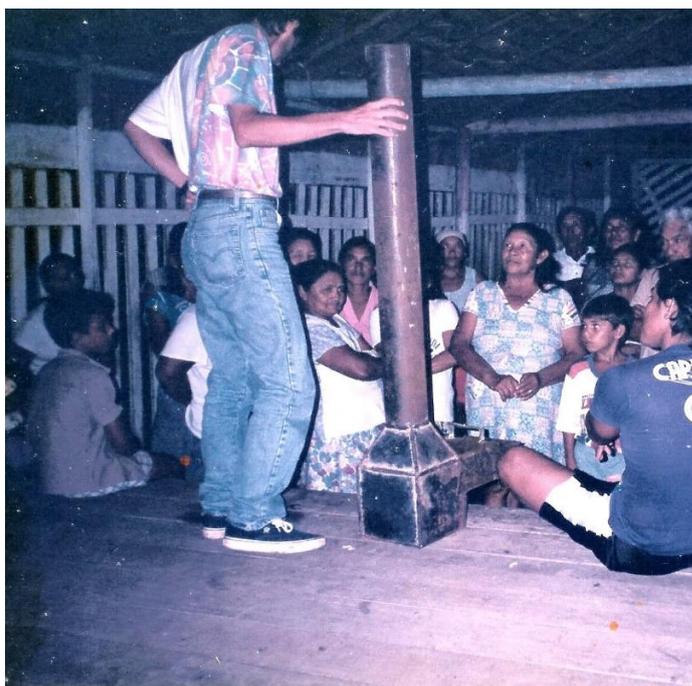


Figura 1. Apresentação do queimador em chapa de aço a uma das comunidades.

Fonte: arquivo pessoal do autor (1992).

No dia seguinte à apresentação, uma dessas artesãs da comunidade de Mocambo construiu um modelo em escala do queimador nesse material, a partir de sugestões de diversos comunitários. Este modelo foi levado para o Campus da UFAM em Manaus para desenvolvimento do primeiro protótipo em escala real (Martins *et al.*, 1992b).

Com apoio do Departamento de Design e Expressão Gráfica da UFAM, foi então desenvolvido um projeto de pesquisa visando aprimorar o design do queimador e adaptá-lo ao fogão a lenha tradicional da região (Barros & Martins, 1992).

Esse projeto permitiu o desenvolvimento de um protótipo de queimador utilizando argila aditivada com a cinza da casca do caraipé nos laboratórios de cerâmica da UFAM, a partir do modelo em escala construído pela artesã. A Figura 2 mostra o protótipo desenvolvido, ainda antes da queima, com o modelo em escala a sua frente.



Figura 2. Protótipo de queimador desenvolvido em Manaus a partir do modelo em escala.

Fonte: arquivo pessoal do autor (1992).

Este protótipo, após a queima, foi então levado novamente para Cabury em junho de 1992 e apresentado à comunidade, que participou ativamente da proposta de adaptação do queimador com o trocador de calor com as panelas. O primeiro protótipo foi construído em uma tarde, e, após sua construção, foi acoplado ao queimador e testado no mesmo dia. Embora ainda com a argila úmida, apresentou comportamento bastante adequado.

Retornando ao Campus da UFAM em Parintins (na época as antigas instalações do Projeto Rondon), foi construído um segundo protótipo de queimador e de trocador de calor com as panelas, incorporando pequenas melhorias. Este protótipo ficou no Campus em Parintins para demonstração. A Figura 3 mostra o segundo protótipo já queimado e incorporando as melhorias (gaveta cinzeiro e tampa basculante na parte frontal). Os testes realizados nesse segundo protótipo apresentaram desempenho superior ao obtido no primeiro, que havia ficado em Cabury.



Figura 3. Protótipo de queimador desenvolvido em Parintins incorporando melhorias.

Fonte: arquivo pessoal do autor (1992).

Em julho de 1992 houve o retorno à comunidade de Mocambo para construir um novo protótipo e deixá-lo para demonstração. A construção do queimador e do trocador de calor com as panelas foi feita em dois dias no clube de mães da comunidade e contou com a participação de 5 artesãs ceramistas, que construíram o queimador e o trocador de calor, este último com a ajuda de marceneiros locais. A Figura 4 mostra o queimador praticamente pronto, mas ainda necessitando secagem e queima para poder ser utilizado. Não foi possível aguardar esse processo, mas foram dadas as instruções para sua conclusão.

O protótipo desenvolvido e descrito nesse artigo foi objeto de análise detalhada e testado sistematicamente em laboratório por Borges (1994) em sua dissertação de mestrado além de dois artigos apresentados em congressos (Pereira *et al.*, 1993; Martins & Gallego, 2009). O queimador e o processo de queima também foram objeto de patente (Martins & Borges, 1993), depositada em 1993, concedida em 2002 e que se tornou de domínio público em 2013.



Figura 4. Protótipo de queimador desenvolvido pelas artesãs em Mocambo

Fonte: arquivo pessoal do autor (1992).

3.1.b Segunda fase proposta de difusão dos fogões: 1996 a 1998

A segunda fase de desenvolvimento e difusão do fogão a lenha de combustão limpa ocorreu no contexto do Projeto Tecnologias Alternativas para o Meio Ambiente Rural: Aspectos Técnicos e Sócio-Econômicos, financiado pelo Programa Trópico Úmido (PTU) do Ministério da Ciência e Tecnologia e CNPq e executado pelo Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico (CDEAM).

O projeto, desenvolvido junto aos grupos domiciliares do Assentamento Iporá do INCRA, situado entre os quilômetros 127 e 146 da Rodovia AM010 entre os municípios de Rio Preto do Eva e Itacoatiara, buscou introduzir tecnologias alternativas para suprir diferentes demandas da comunidade, dentre as quais a redução do consumo de GLP para cocção através do uso do fogão a lenha de queima limpa, escolhido pela comunidade, assim como outras tecnologias.

A estratégia escolhida para a difusão da tecnologia foi através de oficinas de capacitação em construção, manutenção e operação do fogão a lenha de combustão limpa para os que se mostraram mais interessados durante as reuniões com a comunidade. O objetivo era criar multiplicadores do processo,

de forma que cada um dos grupos domiciliares fosse capacitado a construir seu próprio queimador e fogão. A Figura 5 mostra a capacitação para a construção de queimadores em argila durante uma dessas



oficinas.

Figura 5. Oficina de construção do queimador em argila no Assentamento Iporá.

Fonte: arquivo pessoal do autor (1997).

Foram realizados nesse período 5 cursos de capacitação de duração de um dia, nos quais os participantes construíam seus próprios queimadores em argila (Souza et al, 2000). Embora vários dos participantes dos cursos tenham conseguido construir seus queimadores em argila (uma técnica não trivial de ser adquirida), durante o processo de queima para transformá-lo em cerâmica várias peças foram perdidas de forma que efetivamente poucos queimadores foram disponibilizados para uso e demonstração. A figura 6 mostra um dos fogões que foram totalmente finalizados e disponibilizados



para uso.

Figura 6. Fogão a lenha de queima limpa completo instalado no Assentamento Iporá.

Fonte: arquivo pessoal do autor (1997).

No contexto desse projeto foi produzido inclusive um manual para a auto-construção do fogão a lenha de queima limpa (BORGES *et al.*, 1999) que trazia instruções detalhadas sobre como construir o queimador em argila, o forno para queimá-lo e também o trocador de calor com as panelas e a operação do mesmo.

3.1.c Terceira fase: Adaptação do conceito de queima invertida a outros produtos: 2004 a 2006

Essa fase foi realizada no contexto do projeto Inovação Tecnológica em Casa de Farinha, financiado pela FAPEAM e executado pelo CDEAM, que visava “propor intervenções no projeto arquitetônico em casa de farinha e no forno utilizado para torrefação, visando obter melhorias no processo de produção de farinha de mandioca”, que são relatados de forma bastante completa por Souza *et al.* (2006).

Dentre as melhorias propostas e implementadas, estava a adaptação de um queimador utilizando o princípio de queima invertida para uso no aquecimento de um forno para produção da farinha de mandioca.

Partindo de um queimador de queima invertida em argila utilizado para a construção de um fogão a lenha de queima limpa, foram feitos testes para adaptação do mesmo a um forno de farinha tradicional, com tacho de 1,8 m de diâmetro, o que não se mostrou adequado, em função da baixa potência térmica disponível e problemas de transferência de calor para o tacho.

Foi necessário então realizar readequações tanto do queimador, construído então em chapas e vergalhões de aço, como do forno, para permitir uma distribuição do calor de forma mais uniforme por todo o tacho. Após inúmeras melhorias incrementais e testes, foi possível desenvolver um protótipo que atendia às demandas térmicas para a torrefação da farinha de mandioca, utilizando o princípio de queima invertida, apresentado na Figura 7.



Figura 7. Vista frontal e traseira do forno de farinha incorporando o processo de queima invertida, entre outras melhorias (tacho mecanizado).

Fonte: Souza *et al.* (2006).

Estes desenvolvimentos foram apresentados por Mota *et al.* (2006) no Congresso Internacional de Ergonomia, uma vez que além da incorporação do princípio de queima, uma série de outras melhorias ergonômicas, de conforto ambiental e de automatização foram incorporadas ao forno de farinha no desenvolvimento do projeto.

3.2 Discussões

Todos os projetos acima relatados foram desenvolvidos por equipes multidisciplinares, considerando aspectos técnico-científicos, sócio-econômicos e ambientais além de ampla participação com a comunidade, o que permitia uma visão ampla dos problemas a serem enfrentados e das alternativas propostas para suas soluções.

A primeira fase, embora intensa, se desenvolveu em um período curto de tempo (apenas 6 meses), o que, considerando os desafios logísticos de acesso às comunidades e os processos de concepção de forma coletiva, construção e teste dos equipamentos, não permitiu um acompanhamento mais efetivo do processo de incorporação da tecnologia desenvolvida. Cabe ressaltar, nessa fase, a participação e o papel extremamente relevante das artesãs que trabalhavam com cerâmica na região na concepção do protótipo.

A segunda fase foi mais longa, e teve como objetivo realizar a difusão da tecnologia desenvolvida. A estratégia utilizada foi a realização de oficinas de capacitação aos comunitários que mostraram maior interesse na tecnologia, mesmo que não tivessem nenhum conhecimento ou habilidade em relação ao trabalho com cerâmica, que era fundamental para a construção do queimador. Nesse sentido, analisando os resultados pouco significativos obtidos, cabe a reflexão que o foco das oficinas de treinamento poderia ter sido mais direcionado para a capacitação das artesãs que já conheciam a técnica de trabalho com argila, sendo apenas necessário aprimorar a técnica de construção do queimador. Isto poderia inclusive ter reforçado o mercado local e facilitado a difusão da tecnologia desenvolvida.

A terceira fase, de adaptação do princípio de queima invertida de lenha se mostrou tecnicamente viável para a aplicação em fornos de farinha, assim como poderia ser para outras aplicações como padarias, caldeiras e outras aplicações que demandam energia térmica de temperaturas relativamente altas. Sua difusão, entretanto, para um público alvo composto de pequenos negócios, demandaria uma estratégia diferente, envolvendo start-ups e empresas de base tecnológica que pudessem adaptar os conceitos envolvidos nesse princípio de queima para demandas térmicas e aplicações diversas.

4. Conclusões

Os projetos de pesquisa relatados nesse artigo permitiram o desenvolvimento de forma participativa de um protótipo de fogão a lenha de queima limpa mais eficiente, com menor

emissão de poluentes e adaptado às demandas das unidades domiciliares de comunidades amazônicas ribeirinhas. Esse protótipo poderia, além disso ser construído utilizando em sua maior parte recursos locais e com tecnologia disponível também localmente.

Políticas públicas e projetos de demonstração e acompanhamento do desempenho energético, adaptação aos hábitos de cocção locais e aceitação do modelo desenvolvido em uma escala mais ampla poderiam permitir seu aprimoramento e uma efetiva difusão desse equipamento que melhoraria as condições energéticas dos ribeirinhos da região amazônica.

Demonstrou-se também que além do fogão a lenha, equipamento de uso exclusivamente domiciliar, outros equipamentos térmicos usados em processos produtivos locais, como o forno de farinha podem ser adaptados utilizando o conceito de queima invertida, proporcionando uma maior eficiência e condições ambientais mais adequadas.

O uso de lenha para atendimento de demandas térmicas, seja de cocção de alimentos ou de outros processos produtivos, desde que realizado em equipamentos de alta eficiência, baixa emissão de poluentes e de forma sustentável pode ser uma forma interessante de substituição de combustíveis fósseis e de uma maior independência energética para comunidades na Amazônia.

5. Agradecimentos

O autor agradece à Direção da Faculdade de Tecnologia e às Sub-reitorias que à época (1992) apoiaram os projetos propostos, ao Presidente do CDEAM pelos convites para participar nos projetos por ele executados, além do MCT, CNPq e FAPEAM pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dos projetos aqui relatados.

6. Referências

- Barros, I.F.R.; Martins, G. Fogão a Lenha em argila para a região amazônica. **Projeto de Pesquisa** - Sub-Reitoria para Pesquisa e Pós-Graduação da UFAM, Manaus, AM, Brasil, 1992. P. 7.
- Borges, T.P.F. **Fogão a lenha de combustão limpa**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 1994.
- Borges, T.P.F.; Martins, G.; Costa, Y.S.; Araújo, G.; França, B.S. **Manual de Construção do Fogão a Lenha de Queima Limpa**. Editora da Universidade Federal do Amazonas, 1ª ed., 1999. 29p.
- Hasan, A. M; Khan, R.; Verhaart, P. Clean Combustion of Wood? **Internal Report of the Woodburning Stove Group**, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands. 1989, 36 p.
- Martins, G.; Souza, R.C.R.; Costa, Y.S.; Freitas, R. M. Estudo de Caso: Levantamento do perfil de consumo, hábitos e padrões de utilização de lenha, carvão vegetal, GLP e eletricidade nas

Martins G, Rev. Energia Am, Manaus, v. 01, n. 01, jan-jun, 2024.

comunidades de Mocambo (Agrovila de São João) e Cabury (Agrovila de São Sebastião). **Relatório de Pesquisa FT-UFAM**, Manaus, AM, Brasil. 1992a. P. 14.

Martins, G.; Barros, I. F. R. ; Lima, M. D. . Design Social X Novas Tecnologias. **Anais do Workshop Internacional de Renovação Tecnológica em Design**, Curitiba, PR, Brasil. 1992b. p. 8.

Martins, G.; Borges, T. P. F. Processo e equipamento para queima de combustíveis sólidos. 1993. **Patente: Privilégio de Inovação**. Número do registro: PI9301378, Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 31/03/1993; Pedido do Exame: 17/12/1996; Concessão: 05/02/2002. Instituição financiadora: UNICAMP.

Martins, G.; Gallego, A. G. Thermal Performance and Specific CO Emission Evaluation of a Small Scale Downdraft Wood Burner for Domestic Cookstoves. **Proceedings of the 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems -ECOS 2009**, Fóz do Iguaçú, PR, Brazil. 2009, p. 8.

Mota, S. C.; Martins, G.; Souza, R. C. R. Technical and Ergonomic improvements in the furnace design of a manioc flour house. **Proceedings of the 16th World Congress on Ergonomics**, Maastrich, Netherlands. 2006, p. 5.

Prasad, K. K.; Verhaart, P. Combustion and Heat Transfer in Small Scale Woodburning Devices. **Proceedings of the 9th National Heat and Mass Transfer Conference**, India. 1987, 52 p.

Pereira, J. T. V.; Martins, G.; Borges, T. P. F. Queimador de Lenha em Fluxo Co-corrente com o Fluxo de Ar - Projeto e Teste. **Anais do XII COBEM - XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, Brasília, DF, Brasil. 1993. p. 1109-1112.

Souza, R.C. R.; França, B. S.; Pereira, G. A.; Martins, G. Aperfeiçoamento e Difusão de Fogão a Lenha de Queima Limpa no Estado do Amazonas. **Anais do III Encontro de Energia no Meio Rural - AGRENER 2000**, Campinas, SP, Brasil. 2000, p. 10.

Souza, R. C. R.; Chaves, A.; Seye, O.; Martins, G.; Souza, F. C. R.; Mota, S. C. **Relatório Final do Projeto Invação Tecnológica em Casa de Farinha**. CDEAM – UFAM, Manaus, AM, Brasil. 2006. 135 p.



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELETROQUÍMICO MnO_2 SUPORTADO EM SUBSTRATO FLEXÍVEL VISANDO DISPOSITIVO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

ANALYSIS OF THE ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF MnO_2 SUPPORTED ON A FLEXIBLE SUBSTRATE FOR AN ENERGY STORAGE DEVICE

Ewerton Lima Menezes ¹, Fernanda de Nazaré Bailosa Silva ¹, João Carlos Martins da Costa ^{1,2*}, José Costa de Macêdo Neto ¹, Magno da Cunha Nascimento ², Raimundo Ribeiro Passos ², Leandro Aparecido Pocrifka ²

¹ Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, AM, Brasil. E-mail: jcarlosmartins.89@gmail.com

² GEMATA-LEEN, Departamento de Química, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil.

Resumo

O aumento de consumo de energia vem crescendo de forma contínua, criando uma preocupação em relação ao meio ambiente e novas pesquisas estão sendo realizadas com o intuito de minimizar os efeitos. Os óxidos de metais de transição estão em estudos para aplicação em dispositivos de armazenamento de energia, destaca-se o óxido de manganês (MnO_2) pelas características de ser abundante no mundo, não ser tóxicos, ser mais barato e ao comportamento capacitivo ideal. Neste sentido, o trabalho propôs a estudar a síntese, caracterização do eletrodo do MnO_2 em substrato flexível. O procedimento de limpeza do substrato foi em banho de ácido para remoção de impurezas, posteriormente foi lavado com água ultrapura água Mili-Q, secado em estufa à 60 ° C. O Sistema galvânico foi composto por três eletrodos; tecido de carbono como eletrodo de trabalho, eletrodo de referência (Ag/AgCl) e contra eletrodo de platina (Pt). Conectado no equipamento AUTOLAB modelo PGSTAT302N, o método da cronoamperimétrico usado para deposição de material (óxido). A técnica de difração de Raio X (DRX), foi adotada para averiguar a formação do material cerâmico no tecido de carbono, já análises de voltametria cíclica e a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foram as técnicas empregadas para caracterização eletrônica do eletrodo flexível, o desempenho eletrônico em termos de capacitância alcançou $\sim 350 \text{ F.g}^{-1}$, indicando assim sua aplicabilidade como eletrodos em dispositivos de armazenamento de energia.

Palavras-Chave: Óxido de manganês, tecido de carbono cronoamperimétrico, espectroscopia de impedância eletroquímica, dispositivo de armazenamento de energia.

Abstract

The increase in energy consumption has been growing continuously, creating concern regarding the environment and new research is being carried out to minimize the effects. Transition metal oxides are being studied for application in energy storage devices, manganese oxide (MnO_2) stands out for its characteristics of being abundant in the world, non-toxic, cheaper, and ideal capacitive behavior. In this sense, the work proposed to study the synthesis and characterization of the MnO_2 electrode on a flexible substrate. The substrate cleaning procedure was in an acid bath to remove impurities, then it was washed with ultrapure Mili-Q water, and dried in an oven

at 60 ° C. The galvanic system was composed of three electrodes; carbon fabric as the working electrode, reference electrode (Ag/AgCl), and platinum counter electrode (Pt). Connected to the AUTOLAB equipment model PGSTAT302N, the chronoamperometric method used for material deposition (oxide). The X-ray diffraction (XRD) technique was adopted to investigate the formation of the ceramic material in the carbon cloth, while cyclic voltammetry (CV) analyses and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were the techniques used for electronic characterization of the flexible electrode, the electronic performance in terms of capacitance reached $\sim 350 \text{ F.g}^{-1}$, thus indicating its applicability as electrodes in energy storage devices.

Keywords: Manganese oxide, carbon cloth, chronoamperometric, electrochemical impedance spectroscopy, energy storage devices.

1. Introdução

A evolução tecnológica e o crescimento populacional aumentaram exponencialmente a demanda global por energia e, por conta desta necessidade, os novos sistemas de geração e armazenamento de energia estão se tornando cada vez mais eficientes (Aguiar *et al.* 2017; Mishra *et al.* 2019). Materiais à base de tecido de carbono têm sido aplicados para esse fim, mais especificamente, em eletrodos para capacitores eletroquímicos (ECs) (Yan *et al.* 2024).

Esses sistemas são constituídos principalmente por polímeros condutores, materiais à base de carbono e óxidos cerâmicos (Yan *et al.* 2024). Referente aos óxidos, o manganês é o material que possui baixo custo, não apresenta um alto grau de toxicidade e é abundante na natureza. Contudo, a compreensão sobre o comportamento eletrônico do óxido de manganês ainda necessita ser mais estudada referente a sua condutividade e a pseudocapacitância (Nascimento *et al.* 2020; Pugolovkin *et al.* 2023).

Óxido de manganês é objeto de estudo de alguns grupos de pesquisas tais como; Qi *et al.* (2019), Dai *et al.* (2020) e Cherusseri *et al.* (2020), os quais usaram a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). A EIE torna-se possível análise de processos de carregamento de dupla camada, camada ativa do material e transferência de carga e difusão o que não é possível de se observar por outras técnicas eletroquímicas como por exemplo, a voltametria cíclica (Orazem; Tribollet, 2008).

Sendo que ao trabalhar como materiais aplicados como eletrodos em capacitores eletroquímicos, se torna interessante abordagem dos dados em termos de capacitância complexa, que também possibilita fornecer informações sobre repostas capacitivas em frequências intermediária e baixa, já que os capacitores eletroquímicos transitam entre os estados resistivos para altas frequências e capacitivos em frequências intermediárias e baixas (Pocirfka *et al.* 2018).

Embora a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica, possa ser muito útil para as análises de materiais, contudo ainda não é tão explorada, mas colabora a entender alguns fenômenos e no trabalho de Wickramaarachchi *et al.* (2022), estudaram as propriedades pseudocapacitivas do MnO₂, cujo cronopotenciometria (3V) foi adotada para a formação do material, usando como solução precursora de 0,9 mol.L⁻¹ de sulfato de manganês (MnSO₄) suportada em diferentes substratos, sendo folhas flexíveis de carbono e aço inox (304), a estrutura cristalina obtida pela rota adotada foi o γ -MnO₂, já os aspectos morfológicos observados no trabalho foram de *nanoflakes* compactos.

Para as caracterizações eletroquímicas o eletrólito foi de 2 mol.L⁻¹ de NaOH e, ao analisar os comportamentos dos materiais suportados em folha de carbono e aço inox, as resistências de solução entre os materiais foram na ordem de 5 Ω , já os comportamentos capacitivos foi visto que o material depositado em folha de carbono alcançou o aspecto mais capacitivo ao comparado com o MnO₂ depositado em folha de aço inox. Outro grupo que trabalhou na eletrodeposição de MnO₂ foi Liu *et al.* (2021) só que a partir da cronopotenciometria (30 mA) em substrato de poliácridonitrila modificada com nanofibras de carbono.

A solução de partida para formação do MnO₂ foi 0,1 mol.L⁻¹ de MnSO₄, pela caracterização estrutural a fase formada foi γ -MnO₂, já os aspectos topográficos foram observados pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram de *nanoflowers*, nas caracterizações eletroquímicas o eletrólito foi de 0,5 mol.L⁻¹ de sulfato de sódio (Na₂SO₄) e, ao analisar os comportamentos via EIE do material obtido notou-se a formação de resistência de transferência de carga, os autores atribuem tal comportamento ao método adotado no trabalho, já que o uso de correntes consideradas altas influenciam na formação e no desempenho eletroquímico do material.

No estudo realizado por Dai *et al.* (2020), os autores depositaram o MnO₂ oriundo da solução de 0,06 mol.L⁻¹ de acetato de manganês (Mn(CH₃COO)₂) e 0,06 mol.L⁻¹ de Na₂SO₄ pelo método de deposição potenciostática em diferentes tempos (30, 50, 150, 300 e 500 segundos), adotou-se a esponja de níquel como substrato, e como eletrólito adotado foi Na₂SO₄ a 1 mol.L⁻¹, para os testes eletroquímicos, sendo que foi observado que o tempo de síntese influencia diretamente nas respostas eletrônicas, os autores relataram este fator também interfere na uniformidade da deposição do material e tais considerações foram averiguadas pela espectroscopia de impedância eletroquímica.

Este trabalho teve como objetivo realizar a síntese do MnO_2 em tecido de carbono usando como precursor o nitrato de manganês hexahidratado ($\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e caracterizar a sua morfologia via MEV, estrutura cristalina por DRX e avaliar seus desempenhos eletroquímicos por meio da voltametria cíclica (VC) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). Um estudo foi realizado através de comportamento de capacitância e potência complexa, com o objetivo de determinar a constante do tempo de relaxação e as capacitâncias dos materiais obtidos em diferentes condições.

2. Metodologia

Os substratos usados como eletrodos de trabalho foram de tecido de carbono (TC) com dimensões (1 x 1 cm). A limpeza dos substratos consistiu em uma lavagem em $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ de HNO_3 , por 15 min, a etapa seguinte, os substratos consistiu em uma lavagem com etanol P.A em um banho ultrassônico, por 15 min. e por fim os eletrodos foram lavados com água Milli-Q e secados em estufa à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ por 3 horas. O sistema eletroquímico adotado foi de três eletrodos, sendo o TC como eletrodo de trabalho (ET), o qual ocorreu à deposição do material; o eletrodo de referência (ER) utilizou-se prata/cloreto de prata (Ag/AgCl) saturado com KCl, e o contra eletrodo (CE) de placas de platina (Pt).

A técnica de eletrodeposição empregada foi o método cronoamperiométrico, usando a tensão de 1 V.cm^{-2} por 1200 segundos para as soluções de $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e Na_2SO_4 nas concentrações de $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ em temperatura ambiente. As sínteses ocorreram no potenciostato/galvanostato AutoLab modelo PGSTAT302N. A fase e a estrutural do MnO_2 foi obtido pelo equipamento de difração de raios X (XRD-7000) com a linha $\text{K}\alpha$ de cobre [Cu (Ka) $\lambda = 1,542 \text{ \AA}$] (30 kV e 30 mA). A aquisição de dados foi feita na faixa $2\theta = 10^\circ$ a 70° a uma taxa de varredura de 2° min^{-1} .

As análises morfológicas foram feitas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) usando aparelho JEOLIT (500 HR), operando com tensão de 15 kV. Para obtenção das imagens de MEV, as amostras foram fixadas com fita de carbono sobre um toco de cobre e cobertas com uma fina camada de ouro. As análises eletroquímicas feitas via voltametria cíclica em conduzidas em uma janela de potencial correspondendo a $0 \sim 0,8 \text{ V}$, sob velocidade de varredura de 10 mV.s^{-1} . O estudo por espectroscopia de impedância eletroquímica foi realizado se utilizando um range de frequência de 10^4 Hz a 10^{-2} Hz , com perturbação de corrente de 10 mV e tempo de OCP de 600 s.

3. Resultados e Discussão

O padrão de difração de raios X resultante confirma que houve a formação de MnO_2 via eletrodeposição da solução de $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{SO}_4$ com a concentração de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, cujo é exposto na Figura 1. Os valores 2θ dos picos de difração encontrados foram $31,9^\circ$ e $36,3^\circ$. Esses ângulos correspondem aos planos cristalográficos (212) e (101) da fase ortorrômbica do óxido de manganês ($\gamma\text{-MnO}_2$), esta fase encontrada é conforme ao estudo de Rus *et al.* (2016).

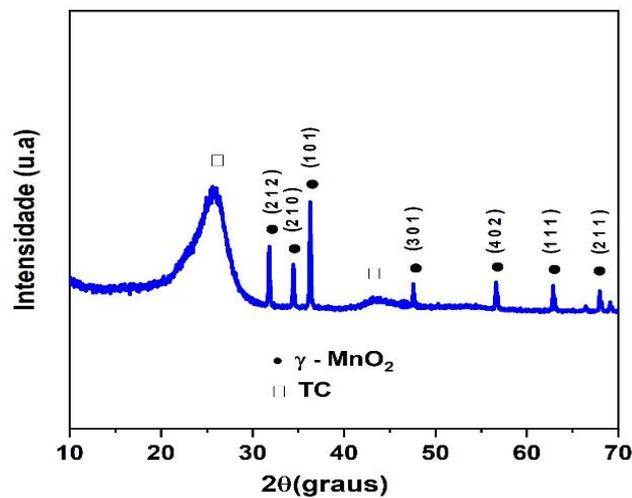


Figura 1. Difratograma do MnO_2 .

Fonte: Autor.

O tamanho do cristalito do MnO_2 foi determinado usando a equação de Debye-Scherrer “Eq 1”, descrita no trabalho de Mishra *et al.* (2018). Cujo d é o tamanho do cristalito, k é um coeficiente de forma (assumindo $k = 0,9$), λ é o comprimento de onda dos raios X ($1,542 \text{ \AA}$), β está relacionado à largura na meia altura do pico, e θ é o ângulo de difração de Bragg. O tamanho médio estimado do cristalito foi de $20,5 \text{ nm}$.

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

A Figura 2 mostra as imagens do MnO_2 eletrodepositado, sendo possível observar uma região revestida na superfície do TC. A partir das imagens MEV ampliadas, pode-se observar que o material de MnO_2 consiste nas formas de nanobastões, que parecem ter uma morfologia áspera e uniforme. Além disso, quando a duração da deposição é prolongada (1200 s), o MnO_2 evolui para um material mais compacto, influenciando na resposta eletroquímica do material

cerâmico. Tais observações também são relatadas em outros estudos de Dupont e Donne (2014), Mishra *et al.* (2019), Dai *et al.* (2020).

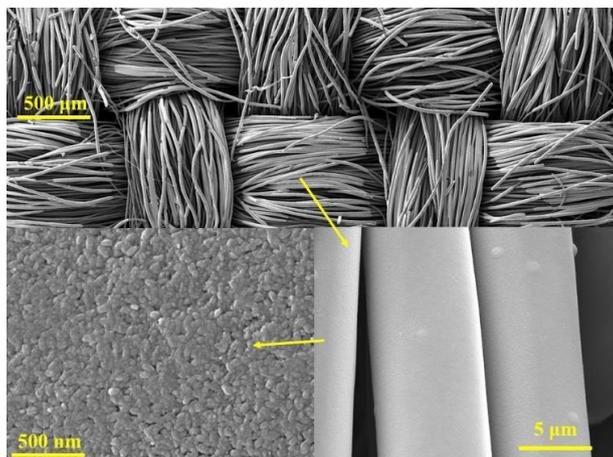


Figura 2. Imagens da microscopia eletrônica de varredura do MnO_2 .

Fonte: Autor.

Para investigar o desempenho eletroquímico, o comportamento voltamétrico do MnO_2 foi analisado na taxa de varredura de $10 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ conforme a Figura 3. O mecanismo de armazenamento de carga no MnO_2 é baseado na intercalação/desintercalação de prótons (H^+) ou cátions alcalinos (M^+), também acompanhada por reações faradâicas estas reações foram descritas por Costa *et al.* (2020).

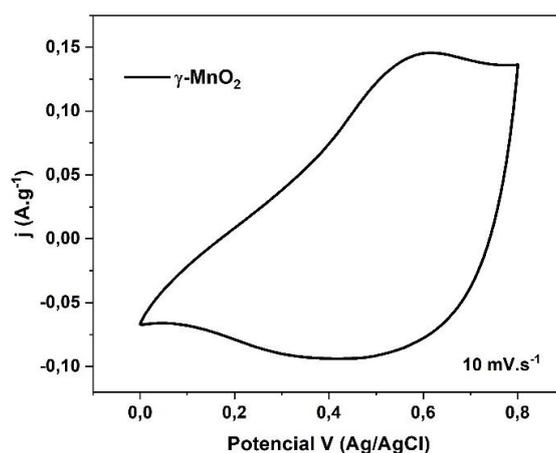


Figura 3. Voltamograma cíclico do MnO_2 em $10 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$.

Fonte: Autor.

A velocidade de varredura adotada, tornou possível a observação de picos redox no voltamograma. Tal fenômeno se deve, as formações dos ombros anódicos e catódicos que são evidências das reações de adsorção e dessorção de sódio e prótons na estrutura do óxido de

manganês, pois na velocidade empregada permitiu a difusão do íon Na^+ (eletrólito) na estrutura do MnO_2 , estes comportamentos também forma relatados nos estudos de Wei *et al.* (2009), Wei *et al.* (2011).

Conforme relatado por Davoglio *et al.* (2018), os valores de capacitância específica foram calculados a partir do voltamograma, onde Q_t são as cargas totais, m é a massa do material ativo e ΔE é a janela de potencial.

$$C_{ce} = \frac{Q_t}{\Delta E m} \quad (2)$$

De acordo com a “Equação 2”, a capacitância calculada foi de $\sim 350 \text{ F.g}^{-1}$. Outro comportamento observado foi a impedância e pelo gráfico de Nyquist Figura 4, o MnO_2 apresentou resistência de solução (R_s) ínfima, também não foi perceptível a formação de semicírculo, que está relacionado a resistência à transferência de carga (R_{tc}) em frequências altas e intermediárias.

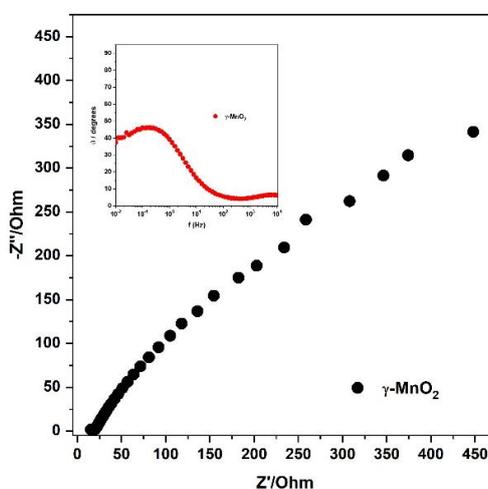


Figura 4. Diagrama de Nyquist e gráfico de Bode no inset do MnO_2 .

Fonte: Autor.

Este comportamento indica que houve uma rápida transferência de carga iônica, sendo essa também observada na análise de voltametria cíclica. Porém, no gráfico de Bode (*inset*) foram percebidas contribuições difusionais via o diagrama de Warburg, pois o ângulo disposto do material foi inferior a 45° .

A partir do comportamento de EIE, foram analisados se o material tem o comportamento capacitivo ideal, cujo valor de Z' é constante e forma uma linha vertical (Pocrifka *et al.* 2018). Pelos dados EIE, eles podem e são transformados e interpretados pelo comportamento de

capacitância e potência complexas, permitindo o estudo mais detalhado da resposta capacitiva em baixas frequências. As contribuições reais e imaginárias da capacitância são obtidas a partir das medidas complexas de impedância, através das “Eqs. 3, 4 e 5” (Tarbena *et al.* 2003, Yang *et al.* 2013).

$$C(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) \quad (3)$$

$$C'(\omega) = \frac{-Z''(\omega)}{\omega|Z(\omega)|^2} \quad (4)$$

$$C''(\omega) = \frac{-Z'(\omega)}{\omega|Z(\omega)|^2} \quad (5)$$

Nessas equações, $C'(\omega)$ e $C''(\omega)$ são as partes real e imaginária da capacitância complexa que é expressa por $C(\omega)$, enquanto $Z'(\omega)$ e $Z''(\omega)$ são respectivamente, as regiões real e imaginária da impedância complexa, sendo ω a frequência angular mostrada por $\omega = 2\pi f$.

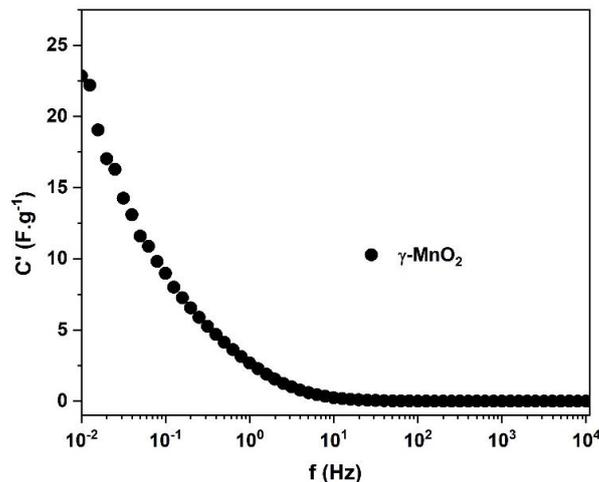


Figura 5. Parte real da capacitância complexa do MnO₂.

Fonte: Autor.

A Figura 5 mostra que o comportamento da parte real $C'(\omega)$ muda após 100 Hz. ($C'(\omega)$ vs f) refere-se à capacitância ativa do MnO₂, à medida que a frequência diminui, a capacitância do material aumenta, cujo alcançou $\sim 23 \text{ F.g}^{-1}$, isso quer dizer que os íons eletrolíticos têm mais

tempo para alcançar e penetrar no material, pois há mais tempo para que haja interações dos sítios ativos do material com o eletrólito e no estudo de Costa *et al.* (2020), observaram o mesmo fenômeno.

O comportamento das capacitâncias imaginárias ($C''(\omega)$ vs f) é mostrado na Figura 6. Esta capacitância representa a energia irreversível dissipada no sistema e está associada a processos de relaxação durante o transporte de íons. A constante do tempo de relaxação é determinada por $\tau_0 = 1/2f\pi$, e este τ_0 é o ponto em que o material oferta a maior potência para o sistema, sendo que o eletrodo tem 15,92 s para oferecer esta potência.

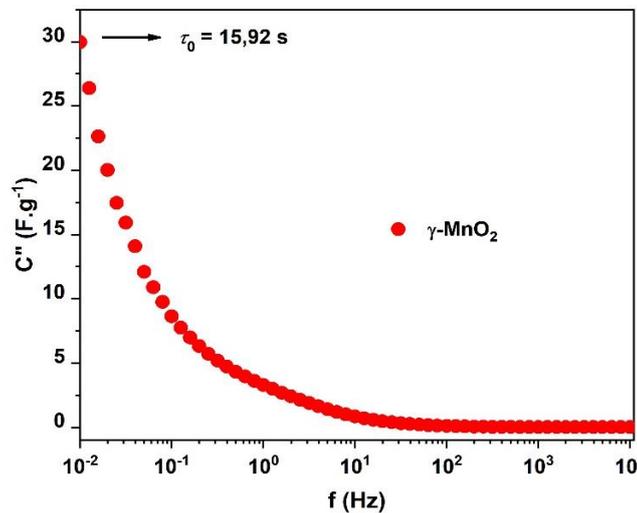


Figura 6. Parte imaginária da capacitância complexa do MnO_2 .

Fonte: Autor.

O $C''(\omega)$ retorna ao estado de neutralidade elétrica após os processos de injeção ou intercalação iônica da interface eletrodo/eletrólito, e este fenômeno é observado no processo de armazenamento de cargas na superfície do eletrodo, e para o material analisado foi encontrada a capacitância de $30,15 \text{ F.g}^{-1}$. Além disso, através dos resultados da capacitância complexa, as respostas capacitivas foram avaliadas em termos das funções $C'(\omega)$ vs $C''(\omega)$.

Esta relação de $C'(\omega)$ vs $C''(\omega)$, conforme observado na Figura 7, cujo o MnO_2 apresentou linha reta da encosta em valores de alta frequência e intervalos intermediários em todas as condições estudadas. Estas inclinações nestas frequências caracterizam o efeito de polarização na interface eletrodo/eletrólito e nos processos de relaxação difusional faradáica, mostrando assim que não há controle sobre a transferência de elétrons (Patil *et al.* 2015). Este parâmetro está relacionado ao comportamento observado no diagrama de Bode no MnO_2 .

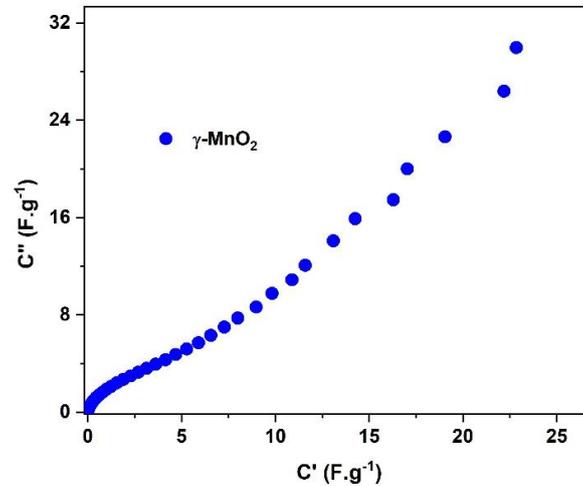


Figura 7. Parte real (C') vs parte imaginária (C'') da capacitância complexa do MnO_2 .

Fonte: Autor.

Ainda por meio de medições EIE, pode-se estudar a potência complexa, considerada útil em termos de comportamento do sistema do ponto de vista elétrico, uma vez que os materiais capacitivos variam entre estados resistivos de alta frequência e estados capacitivos de baixa frequência, sendo a potência expressa de acordo com “Eqs. 6, 7 e 8” (Tarbena *et al.* 2003, Yang *et al.* 2013).

$$S(\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$$

(6)

$$P(\omega) = \frac{\omega C''(\omega)}{|\Delta V_{rms}|^2}$$

(7)

$$Q(\omega) = \frac{-\omega C'(\omega)}{|\Delta V_{rms}|^2} \quad (8)$$

A potência é composta pelas partes real e imaginária; as potências são ativas $P(\omega)$ e reativas $Q(\omega)$, e $|\Delta V_{rms}|^2 = \Delta V_{max}/\sqrt{2}$, sendo ΔV_{max} a amplitude máxima do sinal de corrente alternada (CA). Através da intercessão de $|Q/S| = |P/S|$, este parâmetro define o limite onde o material passa do estado resistivo para o capacitivo ou vice-versa, e corresponde à constante de tempo de relaxação, $\tau_0 = 1/2f\pi$.

A Figura 8 mostra as variações das partes real e imaginária do complexo potência vs f para o MnO_2 . Em altas frequências, o material se comporta como resistores e suas potências

são dissipadas, apresentando elevada potência ativa. Já em baixas frequências, o eletrodo se comporta como capacitores e as potências reativas são altas.

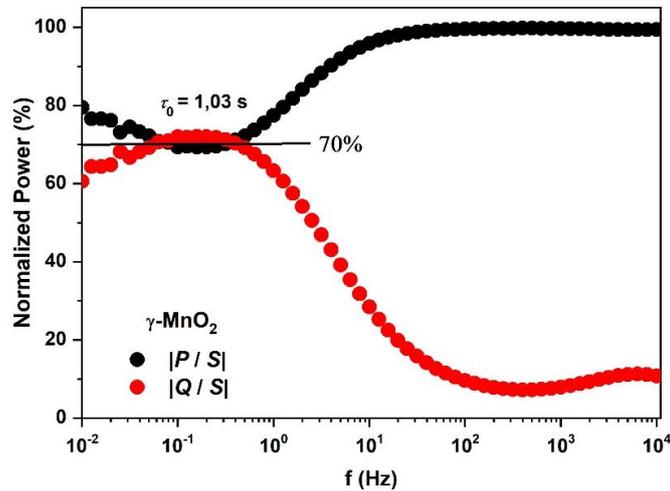


Figura 8. Potência ativa $P(\omega)$ e potência reativa $Q(\omega)$ vs frequência do MnO_2 .

Fonte: Autor.

As interseções de $|Q/S| = |P/S|$ ocorreram em aproximadamente 70% na condição estudada e correspondem ao estado em que o eletrodo libera a energia armazenada com maior eficiência demorando 1,03 s, isso que dizer ponto representa no sistema o momento em que o material deixa de ser resistivo e se torna capacitivo conforme os relatos de Tarbena *et al.* (2003).

Sendo que ainda podemos afirmar que esta interseção se comportou desta forma devido às contribuições difusionais associadas ao diagrama de Warburg. Neste gráfico da potência complexa, observa-se também que o material apresenta um comportamento capacitivo próximo do ideal com valores em $\sim 80\%$ MnO_2 . Os resultados confirmam que o material obtido neste estudo apresenta bom desempenho capacitivo.

Já pelos estudos complexos aplicados neste trabalho, observamos que tanto a capacitância quanto a potência apresentaram resultados que nos ajudaram a entender as contribuições iônicas e difusionais dos materiais no sistema eletroquímico, e esses resultados corroboraram com as análises feitas por Nyquist e Bode. As análises demonstram que a fase ortorrômbica do óxido de manganês ($\gamma\text{-MnO}_2$) fornece respostas eletroquímicas, e esse comportamento torna-se interessante para aplicações como eletrodos para dispositivos de armazenamento de energia.

4. Conclusões

Este trabalho descreveu a formação de MnO_2 em tecido de carbono (substrato) após eletrodeposição em 1200 s. A técnica de difração de raios X (DRX), por sua vez, permitiu detectar a fase estrutural $\gamma\text{-MnO}_2$ e averiguar a formação de material cerâmico sobre o substrato

adotado. Pela de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram a observação do aspecto morfológico do material depositado. Já os estudos eletroquímicos dos materiais foram realizados por voltametria cíclica, destacando os perfis redox do eletrodo de MnO_2 .

Em relação à espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), os gráficos de Nyquist e Bode evidenciaram as atividades iônica e cinética do material, respectivamente. Os valores das constantes de tempo de relaxação para os materiais obtidos foram calculados a partir dos dados do EIE, possibilitando assim a melhor observação do processo de transferência de carga. Os valores obtidos nas potências complexas, que correspondem à intersecção das curvas de $|P/S| = |P/S|$ cujo indica o ponto ideal de operação onde o material libera energia e potência armazenada com mais eficiência em $\sim 70\%$, demonstrando a pronunciada atratividade do material para aplicação como eletrodos de dispositivos (supercapacitores).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro às agências CNPq, FAPEAM e CAPES, à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Centro Multiusuário para Análises de Fenômenos Biomédicos (CAMBio) da UEA pelas imagens de MEV.

6. Referências

- Aguiar, P. C. M.; Domínguez L. A.; Costa J. C. M.; Passos R. R.; Pocrifka L. A. Estudo da eletrodeposição do hidróxido de colbato aplicado a supercapacitores. **JCEC/REQ2**. Vol. 3, p. 696–704, 2017.
- Cherusseri, J.; Pandey, D.; Kumar, K. S.; Thomas, J.; Zhai, L. Flexible supercapacitor electrodes using metal-organic frameworks. **Nanoscale**. Vol. 12, p. 17649–17662, 2020.
- Costa, J. C. M.; Nascimento, M. C.; Silva, E. C.; Pereira, B. L.; Passos, R. R.; Pocrifka, L. A. Galvanostatic synthesis of MnO_2 in carbon cloth: an electrochemical impedance spectroscopy study. **Journal Solid State Electrochemical**. Vol. 24: 1727-1733, 2020.
- Davoglio, R. A.; Cabello, G.; Marco, J. F.; Biaggio, S. R. Synthesis and characterization of α - MnO_2 nanoneedles forelectrochemical supercapacitors. **Electrochimica Acta**. Vol. 261, p. 428-435, 2018.
- Dupont, M. F.; Donne, S. W. Nucleation and growth of electrodeposited manganese dioxide for electrochemical capacitors. **Electrochim. Acta**. Vol. 20, p 219–225, 2014.
- Lui, C. S.; Huang, C. L.; Fang, H. C.; Hung, K. Y.; Su, C. A.; Li, Y. Y. MnO_2 -based carbon nanofiber cable for supercapacitor applications. **Journal of Energy Storage**. Vol. 33, p. 102130, 2021.
- Mishra, R. K.; Prajapati, C. S.; Shahi, R. R.; Kushwaha, A. K.; Sahay, P. P. Influence of electrodeposition modes on the electrochemical performance of MnO_2 films prepared using anionic MnO_4^- (Mn^{7+}) precursor. **Ceramic International**. Vol. 44, p. 5710-5718, 2018.

Mishra, A.; Shetti, N.; Basu, S.; Reddy, K. R.; Aminabhavi, T. M. Review: carbon cloth-based hybrid materials as flexible electrochemical supercapacitors. **ChemElectroChem**. Vol. 6, p. 5771-5786, 2019.

Nascimento, M.C.; Silva E.; Costa, J.C. M.; Passos, R. R; Pocrifka, L. A. Sodium sulfate influence on the electrodeposition of MnO₂ films for application in supercapacitors. **Journal Solid State Electrochemical**. Vol. 24, p: 2543–2553, 2020.

Orazem, M.E.; Tribollet, B. **Electrochemical Impedance Spectroscopy**. Hoboken, 2nd ed., Wiley & Sons. 2028, p. 22-23.

Patil, A.V.; Fernandes, F.C.B.; Bueno, P. R.; Davis, J. J. Immittance electroanalysis in diagnostics. **Analytical Chemistry**. Vol. 87, p. 944-950, 2015.

Pocrifka, L. A.; Ferreira, C. S.; Aguilera, L.; Pereira, E. C. Ion transport and capacite Properties of RuO₂-SnO₂ binary films. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 750, p. 537-542. 2018.

Pugolovkin, L. V.; Levin, E. E.; Arkharova, N. A.; Orekhov, A. S.; Presnov, D. E.; Cherstiouk, O. V.; Tsirlina, G. A. Current oscillations in the course of birnessite electrodeposition as related to resulting microstructure: experimental manifestations and qualitative hypotheses. **Journal Solid State Electrochemical**. Vol. 27, p: 5226, 2023.

Qi, H.; Bo, Z.; Yang, S.; Duna, L.; Yang, H.; Yan, J.; Cen, K.; Ostrikov K. Hierarchical nanocarbon-MnO₂ electrodes for enhanced electrochemical capacitor performance. **Energy Storage Materials**. Vol 16, p. 607–618, 2019.

Rus, E. D.; Moon, G. D.; Bai, J.; Steingart, D. A.; Erdonmez, C. K. Electrochemical behavior of electrolytic manganese dioxide in aqueous KOH and LiOH solutions: a comparative study. **Journal Electrochemical Society**. Vol. 163, p. A356 – A363, 2016.

Tarberna, P, L.; Simon, P. Fauvarque, J. F. Electrochemical characteristics and impedance spectroscopy studies of carbon-carbon supercapacitors. **Journal of the Electrochemical Society**. Vol. 150, p. A292-A300, 2003.

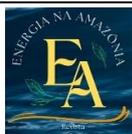
Wei, W.; Cui, X.; Chen, W.; Ivey, D. G. Electrochemical cyclability mechanism for MnO₂ electrodes utilized as electrochemical supercapacitors. **Journal of Power Sources**. Vol. 186, p. 543-550, 2009.

Wei, W.; Cui, X.; Mao, X.; Chen, W.; Ivey, D. G. Morphology evolution in anodically electrodeposited manganese oxide nanostructures for electrochemical supercapacitor applications-effect of supersaturationratio. **Electrochimica Acta**. Vol. 56, p. 1619-1628, 2011.

Wickramaarachchi, K.; Sundaram, M. M.; Henry, D. Surfactant-mediated electrodeposition of a pseudocapacitive manganese dioxide a twofer. **Journal of Energy Storage**. Vol. 55, p. 105403, 2022.

Yan, Z.; Luo, S.; Li, Q.; Wu, Z. S.; Liu, S. Recent advances in flexible wearable supercapacitors: properties, fabrication, and applications. **Advanced Science**. Vol. 11, p. 2302172, 2024.

Yang, C.; Ying, C.; Li, V.; Li, F.; Chan, K. Y. Complex impedance with transmission line model and complexcapacitance analysis of ion transport and accumulation in hierarchical core-shell porous carbons. **Journal of the Electrochemical Society**, Vol. 160, p. H271-H278, 2013.



AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM PROCESSO DE TORREFAÇÃO DE BIOMASSA LENHOSA UTILIZANDO UM REATOR E ELEVADOR ELETRO VIBRANTE

PERFORMANCE EVALUATION OF A WOODY BIOMASS TORREFACTION PROCESS USING A VIBRATING ELECTRICAL ELEVATOR AND REACTOR

Dimitri O. Silva¹, Diego. C. Oliveira², Alan N. Carneiro³, Fernando H. B. Santos³, Danielle R. S. Guerra³, Marcelo O. Silva³, Manoel F. M. Nogueira^{3*}

¹Universidade Federal do Sul e Sudeste Pará, FEM, Marabá/PA, Brasil.

²Universidade Federal de Itajubá, NEST, Itajubá/MG, Brasil.

³Universidade Federal do Pará, FEM, Belém/PA, Brasil. E-mail: mfmn@ufpa.br

Resumo

Este estudo apresenta uma metodologia para a produção contínua de resíduos de biomassa torrada, para fins de aproveitamento energético, utilizando uma tecnologia já existente no processamento de alimentos, o reator e elevador eletro-vibrante (REVE). Este tipo de reator permite um controle mais preciso do processo, além de ser capaz de processar a matéria prima de modo contínuo. Neste trabalho foram utilizados cavacos de madeira, resíduos de uma biomassa de interesse comercial nativa da região amazônica (*Goupia glabra*, Aubl.). São abordadas metodologias de avaliação e caracterização da biomassa in natura e torrada. Após o processamento, são apresentados os principais benefícios proporcionados pela torrefação, como a redução do teor de umidade, aumento do poder calorífico e aumento da friabilidade que resultam na densificação energética do material. De forma adicional, o consumo energético do processo é avaliado e um conceito de eficiência energética da torra é proposto para avaliar a energia necessária para o processamento do material e para a quantificação da energia final do material torrado. Os resultados apontam um crescimento no poder calorífico superior (PCS) na ordem de 20% para uma temperatura de torra de 240°C, aumento na concentração de carbono e redução na concentração de oxigênio.

Palavras-Chave: Conversão Termoquímica, Torrefação de Biomassa, Processo Contínuo.

Abstract

This study presents a methodology for the continuous production of torrefied biomass residues for energy utilization purposes, employing an already existing technology in food processing known as the vibrating electrical elevator and reactor (REVE). This type of reactor allows for a more precise control of the process and is capable of processing raw material continuously. Wood chips and residues from a commercially significant biomass native to the Amazon region (*Goupia glabra*, Aubl.) were utilized in this research. Methodologies for the evaluation and characterization of both raw and torrefied biomass are addressed. Following the processing, the primary benefits of torrefaction are presented, such as reduced moisture content, increased calorific value, and enhanced friability leading to the energetic densification of the material. Additionally, the energy consumption of the process is evaluated, and a concept of torrefaction

energy efficiency is proposed to assess the energy required for material processing and quantify the final energy content of the torrefied material. The results indicate a 20% increase in higher heating value (HHV) at a torrefaction temperature of 240°C, along with elevated carbon concentration and reduced oxygen concentration.

Keywords: Thermochemical Conversion, Biomass Torrefaction, Continuous Process.

1. Introdução

O desenvolvimento econômico global acompanhado do aumento populacional e da crescente demanda por energia impactam diretamente nas emissões de CO₂, uma vez que atualmente a dinâmica das relações comerciais, produção industrial, serviços públicos e de uma infinidade de aspectos do cotidiano baseiam-se majoritariamente na utilização de combustíveis fósseis (Covert, Greenstone, and Knittel 2016). Em relação à energia, as fontes renováveis vêm se mostrando uma solução para mitigar estes impactos, sendo capazes de reduzir emissões em escala global, porém com algumas ressalvas para aplicações localizadas (Dong *et al.* 2018).

As energias renováveis estão cada vez mais presentes seja nas geradoras de energia, nas indústrias ou até mesmo nos lares, através de diferentes aplicações como painéis solares, turbinas eólicas, plantas de potência movidas à biomassa, etc., presentes em muitos processos sustentáveis. A Amazônia possui um potencial expressivo para a bioeconomia sustentável através de projetos bem delineados em termos de impactos ambientais e econômicos que podem ser empreendidos na região, como é o caso da produção de madeira em áreas já degradadas com a utilização de espécies nativas como a cupiúba (*Goupia Glabra* Aubl.) (De Goes *et al.* 2023). Uma indústria moveleira que utilize essa matéria-prima pode ter a sua sustentabilidade incrementada através do aproveitamento energético dos resíduos gerados (Silva *et al.* 2018).

Atualmente, a biomassa vegetal em sua forma bruta é amplamente utilizada para produção de energia, por meio da combustão e gasificação, gerando calor e potência para processos industriais. Porém, a biomassa bruta possui alto teor de umidade, médio poder calorífico, baixa densidade a granel e possui comportamento higroscópico. Estas características dificultam muitas vezes a sua utilização como combustível sólido e a sua logística de transporte e armazenamento.

A biomassa lignocelulósica são compostas principalmente por estruturas de lignina, hemicelulose e celulose (Basu, 2013). Comparada à celulose e à lignina, a hemicelulose apresenta menor grau de polimerização, sendo intensamente degradada durante a torrefação, liberando gases voláteis leves como CO e CO₂ e tem efeito significativo na perda de massa. A celulose apresenta natureza higroscópica, aumenta a lacuna entre as cadeias de celulose, resultando no inchaço da biomassa. Durante o tratamento térmico o produto sólido sofre fenômenos de retração, causando

variações dimensionais. A lignina é considerada termicamente estável em uma ampla faixa de temperatura de 100 °C a 900 °C, permanecendo menos modificada após o processo de torrefação (Nhuchhen *et al.*, 2014).

A torrefação é um pré-tratamento que visa otimizar as características da biomassa, aumentando o seu poder calorífico, enfraquecendo o material, removendo a umidade, melhorando a resistência aos microrganismos e aumentando a densidade energética de forma a obter um biocombustível de elevada qualidade. O produto final torrado apresenta baixo teor de umidade, boa friabilidade e melhores relações O/C e H/C, tornando este processo interessante como pré-tratamento de biomassa (Koppejan *et al.*, 2012). Além disso, a biomassa torrada possui maior reatividade que a biomassa bruta, o que favorece sua aplicação em processos de co-combustão em indústrias que utilizam carvão para geração de energia. (Nhuchhen *et al.*, 2014). Após a torrefação, o material pode ser posteriormente processado em briquetes ou pellets, aumentando sua densidade energética em comparação com a matéria-prima original (Chen *et al.* 2015; Tumuluru *et al.*, 2011b; Bissen, 2009).

As tecnologias utilizadas no processo de torrefação são adaptadas de outras aplicações, como secadores e fornos. Os reatores mais comumente usados são o tambor rotativo, o reator tipo parafuso, o forno de soleira múltipla e o secador de correia. As desvantagens desses reatores são as limitações de tamanho e capacidade produtiva, que geralmente ocorre em batelada. Outra questão é a uniformidade do material, em alguns destes processos apenas partes da biomassa ficam em contato com a parede aquecida (KOPPEJAN *et al.*, 2012).

A tecnologia do reator elevador eletro vibrante foi utilizada pelos autores Doassans *et al.* (2014) para comparar quatro diferentes desempenhos de biomassa, em diferentes condições. Seu estudo mostrou melhorias nas características desejáveis da biomassa torrada como valor do poder calorífico superior - PCS, melhor friabilidade, uniformidade e baixa umidade.

Este artigo apresenta a avaliação do desempenho de uma torrefação aplicada sobre biomassa lenhosa amazônica em diferentes condições de temperatura e tempo utilizando um reator elevador eletro vibrante em escala piloto. O alto poder calorífico, as análises imediata e elementar foram utilizadas para verificar as alterações sofridas pela biomassa no processo de torragem. Por fim, foi examinada a influência da temperatura e do tempo de residência nas características finais da biomassa e no custo de produção no Brasil com base no consumo de energia.

2. Metodologia

2.1 Reator Elevador Eletro Vibrante “REVE”

Os experimentos foram realizados utilizando um reator em escala piloto fabricado pela Revtech Process Systems denominado “REVE”, Figura 1.

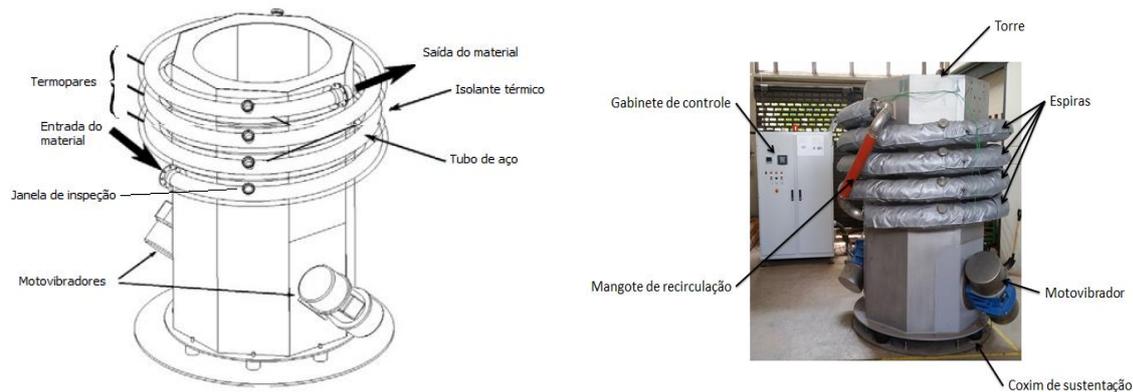


Figura 1 – Reator Elevador Eletro Vibrante (REVE).

Adaptado de (Doassans-Carrère, Muller and Mitzkat, 2014).

O reator consiste em uma torre octogonal que suporta um tubo espiral de aço inoxidável com diâmetro externo de 88,9 mm e comprimento de 21 m. Dois motores de vibração desbalanceados são acoplados na torre. A biomassa é transportada para cima e misturada no tubo espiral de aço inoxidável através da vibração provocada pelos motores. A velocidade de movimento das partículas pode ser ajustada variando o ângulo do motor, a posição dos pesos excêntricos e a frequência de rotação (Doassans *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2015).

O reator usa o efeito Joule causado pelo fluxo de eletricidade pela parede do tubo usando o aquecimento do mesmo por impedância. O tubo espiral de aço inoxidável é conectado a um painel de controle de potência onde a temperatura da espiral ou a potência elétrica enviada pode ser ajustada de acordo com o teste realizado. A biomassa é aquecida pelo contato com a parede interna do tubo quente. A temperatura do tubo é monitorada por termopares tipo K instalados ao longo do tubo espiral. Os gases e vapores liberados durante o processo de torrefação são extraídos das espirais através de um sistema de exaustão que causa depressão no interior do reator.

Para aumentar o tempo de residência da biomassa no reator, a saída do tubo foi conectada à entrada, modificando o torrador de fluxo contínuo para batelada. A quantidade máxima de biomassa que pode ser introduzida no reator é aquela que ocupa, no máximo, 40% do volume interno, o que significa um volume disponível igual a $4,27 \times 10^{-2} \text{ m}^3$. Esse cuidado foi tomado para não prejudicar a movimentação da biomassa e não obstruir as espirais durante o processo

de torrefação. Além do volume máximo a ser ocupado, deve-se conhecer a densidade a granel dos cavacos de madeira que serão inseridos no reator para determinar a massa a ser introduzida no reator.

O ponto de partida para todas as análises é a biomassa bruta ou *in natura*. Para este processo, ela foi previamente seca tendo a sua umidade ficado na faixa de 15-20%. Como as conclusões neste trabalho são em base seca, para a biomassa úmida, o efeito da torrefação é mais intenso como por exemplo, o aumento do poder calorífico inferior.

2.2 Testes de torrefação

Dois tipos de testes foram realizados para avaliar a influência da temperatura nas propriedades da biomassa torrada. Primeiramente foi fixado o tempo de residência e foi variada a temperatura máxima da parede. Em seguida, foi escolhida uma temperatura e foi variado o tempo de residência. A velocidade de avanço da biomassa escolhida para todos os testes foi de 0,38 m/s, a velocidade máxima do avanço da biomassa dentro da espiral, avaliada em estudos prévios (Silva *et al.*, 2015).

O tempo de residência inicialmente adotado foi de 30 minutos, tempo de residência típico para diversos tipos de biomassa. Wu *et al.* (2012), utilizaram o mesmo tempo de residência com microalgas; Bridgeman *et al.* (2008) com salgueiro e palha de trigo; Uemura *et al.* (2011), utilizaram o mesmo tempo de residência com cachos de frutos vazios e Lu *et al.* (2012) com resíduos agrícolas de café. Os testes de torrefação foram realizados nas temperaturas de parede de 220, 240, 260, 280 e 300°C. As temperaturas foram selecionadas de acordo com a classificação dada por Chen *et al.* (2015), que considera uma torrefação leve na faixa de 200 – 235°C, uma torrefação média está na faixa de 235 – 275°C e uma torrefação severa entre 275 e 300°C. Terminados os testes variando as temperaturas, optou-se pela temperatura de 240°C para avaliar o impacto do tempo de residência nas características da biomassa, variando esse tempo para 20 e 40 minutos.

Após ser alimentado com a biomassa, o modo de vibração do reator foi ligado por 5 minutos para uniformizar a distribuição da biomassa no reator. A partir deste ponto, a temperatura do reator aumentou da temperatura ambiente até a temperatura definida para o teste. Paralelamente foi acionado o sistema de exaustão de gases. Quando a parede atingiu a temperatura alvo, foi acionado um cronômetro, por 30 minutos, quando o aquecimento do tubo foi desligado e o material removido e resfriado por convecção na temperatura ambiente.

2.3 Caracterização energética das amostras

A cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.) foi escolhida para este trabalho por ser uma espécie de interesse comercial que apresenta maiores taxas de crescimento em áreas degradadas quando comparada a outras espécies nativas (De Goes *et al.* 2023). É uma madeira comumente encontrada na região Amazônica, utilizada em construções pesadas e leves como postes, vigas, caibros e sarrafos (Nahuz, 2013; Schwengber *et al.*, 2005).

As amostras foram caracterizadas energeticamente antes e depois do processo de torrefação através da análise imediata e elementar e da determinação do poder calorífico superior. A análise imediata foi realizada utilizando uma mufla JUNG LF 910 e uma estufa Onidonto EL 1.4 seguindo as normas europeia de padronização de biocombustíveis sólidos: CENT/TS 14774-1:2004, CENT/ TS 15148:2005 e CENT/TS 14775:2004. A análise elementar foi realizada utilizando um analisador elementar Perkin Elmer CHNS/O 2400 série II de acordo com as normas ASTM E775 (1987), ASTM E777 (2008), ASTM E778 (2008), ASTM E870 (2013) para obtenção do teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio por diferença. O poder calorífico superior (PCS) foi obtido por meio de um calorímetro Ika Werke C2000 Control conforme ASTM E711.

2.4 Quantificação do consumo de eletricidade

O consumo de energia elétrica do reator durante cada teste foi obtido por meio de um monitor de energia elétrica modelo SAGA 4500 Landis+Gir, acoplado ao fornecimento de energia do equipamento. Foram realizados testes com o reator vazio para verificar a diferença entre o consumo de energia do reator vazio e com biomassa. Essa diferença reflete a energia recebida pela biomassa durante o processo. O comportamento do consumo de energia foi dividido em dois tipos: energia consumida durante o regime transitório e energia consumida durante o regime permanente. Observou-se que a demanda energética no regime transitório é muito maior do que no regime permanente. Portanto, considerou-se que, em um processo contínuo, o reator aqueceria apenas uma vez e a energia do regime transitório seria diluída durante o tempo de operação. Portanto, para cálculos de consumo de energia no regime transitório, considerou-se que a diferença entre a energia do reator vazio e cheio é a quantidade de energia transferida para a biomassa. No regime permanente considerou-se que a energia necessária para manter o processo é a energia medida pelo monitor de energia elétrica SAGA. Em seguida, a energia total fornecida ao processo foi definida pela Eq. (1).

$$E_F = (E_{TF} - E_{TE}) + E_{SF} \quad (1)$$

Onde E_F é a energia fornecida à biomassa, E_{TF} é a energia consumida em regime transitório por um reator cheio; E_{TE} é a energia consumida em regime transitório por um reator vazio; E_{SF} é a energia no reator cheio em regime permanente.

2.5 Aproveitamento mássico, fator de aprimoramento energético, rendimento energético da biomassa e eficiência energética do processo.

O aproveitamento mássico é a fração da biomassa inicial que permanecerá como produto torrado (Basu, 2013). O aproveitamento mássico (Y_m) é obtido pela razão entre a massa torrada (m_T) e a massa inicial (m_R), Eq. (2).

$$Y_m(\%) = \frac{m_T}{m_R} \quad (2)$$

O fator de aprimoramento energético (F_{ae}) indica em quanto aumentou a densidade energética (MJ/kg) do material torrado em comparação com a do bruto. É obtido pela razão entre o poder calorífico superior do material torrado (PCS_T) e o mesmo da massa inicial (PCS_R), Eq. (3).

$$F_{ae} = PCS_T/PCS_R \quad (3)$$

O rendimento energético da biomassa (Y_{eb}) avalia quanto energia (MJ) existe no material torrado em comparação com o bruto. É obtido fazendo a razão do produto da massa torrada pelo seu PCS com o mesmo da biomassa bruta. Simplificando, é a multiplicação do aproveitamento mássico (Y_m) com o fator de aprimoramento energético (F_c), Eq. (4).

$$Y_{eb}(\%) = Y_m \times F_{ae} \quad (4)$$

A eficiência energética do processo compara a quantidade de energia que o material torrado possui com a quantidade de energia que o material bruto possui somado a energia necessária para a torrefação. Ela é obtida pela razão entre a energia contida no material torrado e a energia contida no material bruto juntamente com a energia utilizada para torr -lo (E_F), Eq. (5).

$$E_p(\%) = \frac{(m_T \times PCS_T)}{(m_R \times PCS_R) + E_F} \quad (5)$$

3. Resultados e Discussão

Para calcular a massa específica a granel dos cavacos de madeira, um volume conhecido foi preenchido com cavacos e seu peso foi medido. A massa específica a granel foi obtida através da sua rela o massa/volume e o valor obtido foi de 316 kg/m³ o que implica na capacidade máxima de enchimento do reator de 13,5 kg. Todos os experimentos utilizaram 10

kg de material na forma de cavacos de madeira com a maior dimensão variando entre 2 – 50 mm. A Tabela 1 mostra a caracterização da biomassa bruta (umidade 13%).

O processo de torrefação altera a composição inicial da biomassa. A Tabela 2 mostra os resultados da análise elementar e imediata do produto torrado, bem como seus PCS e PCI, variando a temperatura de torrefação.

Tabela 1. Caracterização da cupiúba *in natura* (base seca).

Análise elementar (%)	Análise imediata (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
C 49,09	Matéria volátil 82,89	19,36
H 7,83	Carbono fixo 16,72	17,64
N 0,19	Cinzas 0,39	
O 42,52		

Tabela 2 – Caracterização da cupiúba torrada em diferentes temperaturas (base seca).

Temperatura °C	Análise Elementar (%)				Análise Imediata (%)			Poder Calorífico (MJ/kg)	
	C	H	N	O	Volátil	Carb. Fixo	Cinzas	PCS	PCI
220	51,18	6,8	0,17	41,41	81,91	17,66	0,44	19,75	18,25
240	52,73	6,16	0,32	40,79	79,75	19,67	0,58	20,43	18,86
260	53,51	6,44	0,28	39,28	77,89	21,57	0,54	20,76	19,35
280	55,38	5,52	0,21	38,3	73,47	25,93	0,6	21,84	20,62
300	59,68	4,46	0,21	35,16	66,71	32,8	0,48	23,29	22,31

Os resultados da análise elementar mostram aumento do teor de carbono a medida que a temperatura de torrefação (da parede) aumenta, enquanto o teor de hidrogênio e oxigênio se comporta de forma inversa. Em geral, o aumento da temperatura de torrefação resulta no aumento do teor de carbono e na redução do teor de hidrogênio e oxigênio, devido principalmente à formação de H₂O, CO e CO₂ (Tumuluru *et al.*, 2011a).

A Figura 4 mostra que o O/C e o H/C da biomassa bruta são os mais elevados. À medida que a temperatura de torrefação aumenta, há uma redução da relação O/C e H/C e a biomassa torna-se mais semelhante ao carvão. Os valores obtidos para o carvão variam entre 0,01 – 0,4 para O/C e 0,4 – 1 para H/C (Bridgeman *et al.*, 2008). Essa redução na relação O/C e H/C resulta na formação de menor quantidade de fumaça e vapor d'água e, conseqüentemente, menor perda de potência durante os processos de combustão e gaseificação (Tumuluru *et al.*, 2011a).

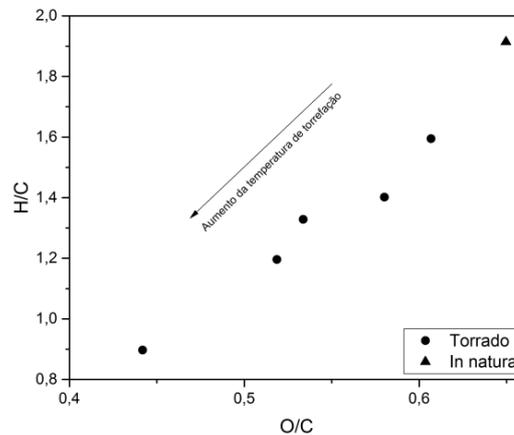


Figura 4 – Diagrama de Van Krevelen para biomassa torrada a diferentes temperaturas com tempo de residência de 30 minutos.

O resultado da análise imediata mostra uma visão macro do que acontece internamente durante o processo de torrefação. Esse processo transforma as cadeias poliméricas do material em cadeias menores, liberando material volátil contendo oxigênio e hidrogênio presente na composição da biomassa bruta o que provoca um aumento na fração de carbono fixo presente na biomassa torrada (Tumuluru *et al.*, 2011a).

A Figura 5 compara o teor de matéria volátil e de carbono fixo com o aumento da temperatura de torrefação. Aumentando a temperatura, o teor de voláteis diminui e o de carbono fixo aumenta.

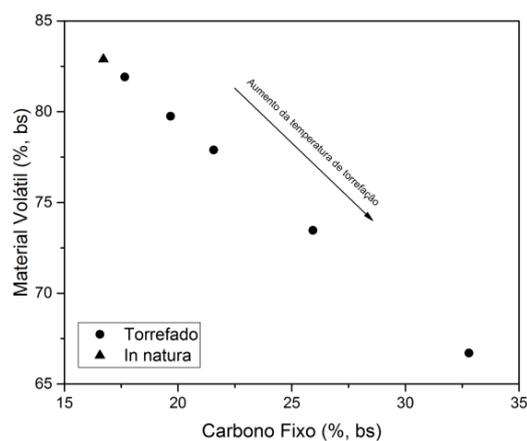


Figura 5 – Comparação dos teores de carbono fixo e voláteis para diferentes temperaturas com tempo de residência de 30 minutos.

A Figura 6 mostra que o PCS do material torrado aumenta com o aumento da temperatura de torrefação (temperatura da parede). Tal aumento no poder calorífico se deve ao aumento da população de carbono e à redução da população de oxigênio (Bem *et al.*, 2012). A mesma

tendência foi observada nos trabalhos de Deng *et al.* (2009) com talo de colza, Wannapeera *et al.* (2011) com *Leucaena* e Park *et al.* (2012) com pinheiro.

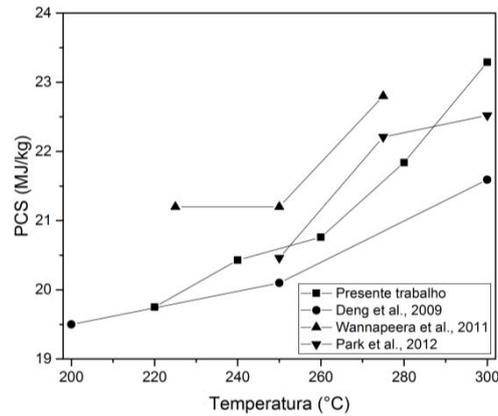


Figura 6 – Efeito do aumento da temperatura no PCS mantendo a temperatura de torrefação.

A Figura 7 mostra que o fator de aprimoramento energético (F_{ae}) aumenta com o aumento da temperatura de torrefação. Esse fato foi também registrado por outros autores também mostrados nessa figura.

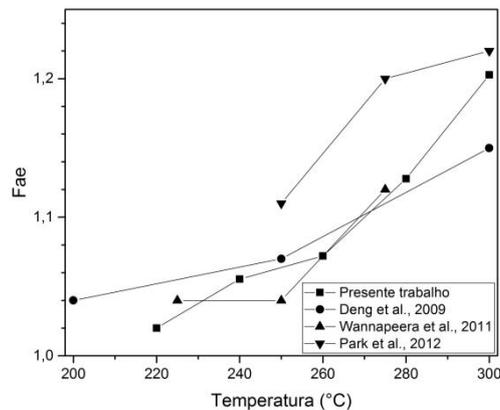


Figura 7 – Efeito do aumento da temp. no fator de aprimoramento energético (time 30 min).

A Figura 8 apresenta a variação do rendimento mássico com o aumento da temperatura de torrefação. Quanto maior for a temperatura de torrefação, maior será a perda de massa decorrente da liberação de água, vapor e alguns voláteis (Chen *et al.*, 2015).

Resumindo, aumentando a temperatura de torrefação, o PCS do material torrado aumenta e a sua massa diminui. Num processo de combustão, a variável de interesse é a energia liberada, ou seja, o produto da massa pelo PCS (ou PCI). Portanto deve haver uma condição de máxima energia liberada e para isso é usado os conceitos de rendimento e eficiência energética.

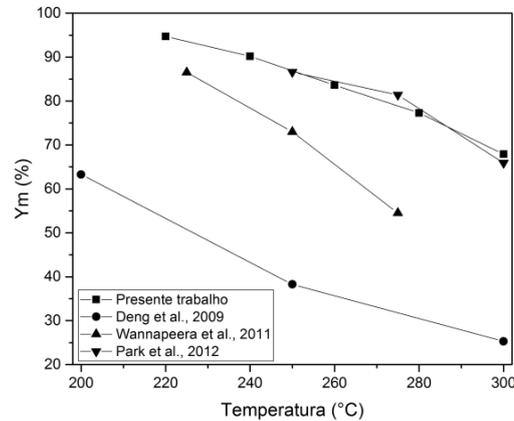


Figura 8 – Efeito do aumento da temperatura no aproveitamento mássico (tempo 30 min).

Os resultados dos cálculos de rendimento energético (Y_{eb}) são mostrados na Figura 9. Essa figura mostra que o aproveitamento mássico tem mais impacto no rendimento do que o aprimoramento: gradiente de redução da massa é mais intenso do que o do aumento do PCS. Conseqüentemente, o rendimento energético da biomassa é inferior a 100%. Nos casos em que a perda de massa é inferior ao aprimoramento energético o rendimento energético da biomassa pode ser superior a 100%, conforme estudo feito por Chin *et al.* (2013) onde os resultados atingiram acima de 130%.

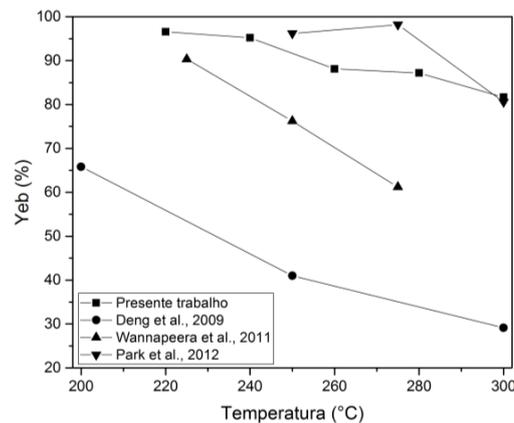


Figura 9 – Rendimento energético da cupiúba (time 30 min).

Os resultados de Y_{eb} versus Temperatura/Tempo (Figura 10) para a temperatura de 240°C é particularmente interessante. Enquanto para outras temperaturas o rendimento diminui com o aumento do tempo de residência, a 240°C aconteceu o crescimento do Y_{eb} com um pico de Y_{eb} (a massa permaneceu constante nessa faixa). Este resultado mostra um exemplo do equilíbrio que deve ser encontrado entre temperatura e tempo de residência para obter melhores

resultados no processo de torrefação. Neste caso, observa-se que o tempo 40 minutos e temperatura 240°C apresentou um Y_{eb} (96%) superior ao tempo 30 minutos e temperatura 260°C (88%). Porém, este último apresentou um consumo de energia menor (Tabela 4).

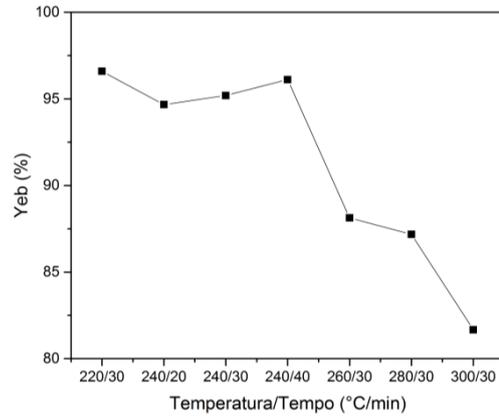


Figura 10 – Eficiência energética da biomassa em função da temp. e tempo de residência.

A Figura 11 apresenta o comportamento das curvas de temperatura e potência durante os ensaios para as temperaturas de 220, 260 e 300°C, indicando o regime transitório e permanente.

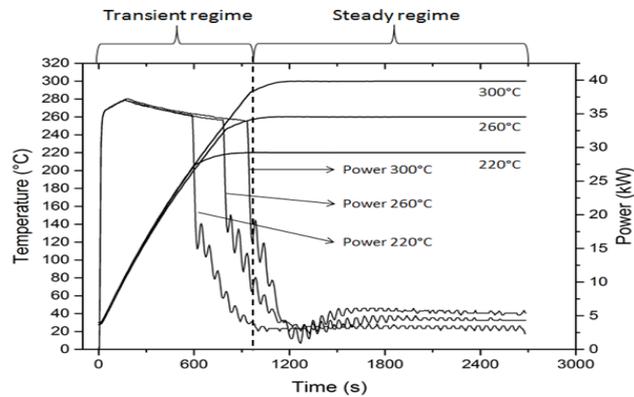


Figure 11 – Variação da temperatura e potência do torrador com o tempo.

Durante os regimes transitórios, as curvas de temperatura e potência apresentam altos gradientes até que a temperatura da parede atinja o valor alvo. Após esse ponto, a potência é reduzida drasticamente para manter a temperatura constante. Os comportamentos das curvas são semelhantes para cada temperatura alvo. A energia para aquecer e manter o reator vazio a

temperatura alvo é mostrada na Tabela 4. Na Tabela 5 é mostrada a energia para aquecer e manter o reator cheio na temperatura alvo com 10 kg de cavaco de cupiúba.

Tabela 4 – Consumo de energia do REVE **em vazio** para o aquecimento inicial do reator e para manter a temperatura alvo constante por 30 minutos.

Temperatura °C	Transiente kJ	Permanente kJ
220	21.007	6.074
240	23.174	7.895
260	25.394	9.226
280	28.197	10.455
300	31.041	11.450

Tabela 5 – Consumo de energia do REVE **cheio** para o aquecimento inicial do reator e para manter a temperatura alvo constante por 30 minutos.

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Energia (kJ)	
		Regime Transiente	Regime Permanente
220	30	26.234	8.341
240	20	28.938	6.494
240	30	29.801	8.883
240	40	28.885	11.797
260	30	33.390	9.425
280	30	36.968	10.943
300	30	40.546	12.390

Num processo de produção contínuo, o tubo espiral será aquecido apenas uma vez, diluindo a energia gasta durante o regime transitório no seu tempo de operação. Como este estudo foi realizado em batelada, do total de energia consumida durante o processo com cavaco (transiente e permanente), foi subtraído a quantidade de energia transiente para aquecer a espiral vazia. A energia total fornecida ao reator calculada pela Eq. (1) é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6. Energia elétrica total consumida no processo contínuo.

Temperatura (°C)	Tempo (min)	Energia total (kJ)
220	30	13.568
240	20	13.121
240	30	15.510
240	40	18.424
260	30	17.421
280	30	19.714
300	30	21.895

A Figura 12 mostra a curva eficiência energética do processo versus temperatura e tempo. Essa eficiência relaciona a energia contida na biomassa torrada com a quantidade de energia gasta no processo de torrefação. Quanto maior o tempo de residência e a temperatura de torrefação, maior é a energia gasta no processo. Essa figura mostra que o comportamento da curva é fortemente influenciado pela perda de massa. Até a condição 240°C e 40 min, a eficiência é basicamente constante. Acima desses valores a eficiência energética reduz.

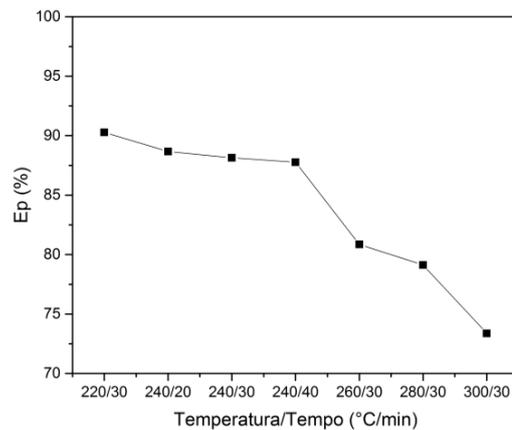


Figura 12. Eficiência energética em função da temperatura e tempo de residência.

A Tabela 7 apresenta uma avaliação do custo de produção. Os valores foram calculados utilizando o custo médio da eletricidade industrial no Brasil, que é de R\$1.273,65 (CPFL 2023). 160,63 US\$/MWh (Firjan, 2016). Foi avaliada a quantidade de energia necessária para torrar uma tonelada de material.

Tabela 7. Custo da produção para cada temperatura e tempo de residência.

Temperatura °C	Tempo min	Energia kWh/ton	Custo da Torrefação US\$/ton
220	30	398,00	63,62
240	20	404,21	64,47
240	30	477,65	76,18
240	40	567,70	90,54
260	30	588,73	93,90
280	30	708,43	112,99
300	30	895,76	142,87

Os resultados mostraram que o reator possui consumo energético relativamente baixo, com baixos custos de processamento para obtenção do material com as características apresentadas anteriormente. Como muitas empresas pagam valores próximos pelo descarte do material, a utilização da torrefação para gerar um produto de qualidade superior que possa ser

utilizado como combustível torna-se um investimento atrativo economicamente. As informações de consumo de energia ainda são pouco divulgadas dentro da torrefação porque a maioria dos reatores está acoplada a saídas de gás ou outras fontes de energia provenientes de um processo estabelecido. Para esses processos é difícil contabilizar a quantidade de energia que é efetivamente enviada para a torrefação.

4. Conclusões

O reator REVE mostrou ser capaz de torrar cavacos de madeira continuamente de forma rápida, prática, limpa e eficiente em termos energéticos. Processos convencionais de torra de biomassa para fins energéticos que utilizam calor de combustão podem não ser tão precisos em termos de controle de processo, qualidade do produto final e emissões. A utilização de energia elétrica para este propósito apesar de causar estranheza, pode ser uma alternativa sustentável com o avanço de fontes renováveis de energia como a fotovoltaica. Trabalhos futuros comparando o reator REVE com as tecnologias tradicionais em diferentes cenários produtivos serão capazes de responder a estas questões. Dois são os principais parâmetros de controle da torrefação: a temperatura de torrefação e o tempo de residência. O primeiro se mostrou mais relevante pois quanto maior a temperatura empregada no processo, maior foi a perda de massa das amostras. Uma vez que a energia contida no material torrado é o produto da massa do produto torrado com o seu PCS, a perda de massa é maior que o ganho de PCS, causando redução da energia disponível no material torrado. Além disso, o tempo de residência está associado a quantidade final de eletricidade consumida.

Mantendo a temperatura de torrefação abaixo de 240°C e o tempo de residência menor que 40 minutos, a eficiência e eficácia do processo foi elevada conforme a métrica utilizada. Acima desses valores, a eficiência do processo decai rapidamente. Salienta-se que o rendimento e a eficiência energética neste trabalho usaram como referência os parâmetros energéticos da cupiúba já seca. Se forem utilizadas as características da madeira úmida, os ganhos energéticos serão maiores. Durante o manuseio do material bruto e torrado, foi verificado que a reatividade do material torrado aumentou significativamente bem como foi reduzida a sua capacidade de absorver água, sua estrutura ficou mais frágil facilitando a moagem e o armazenamento. O comportamento do consumo de energia nos regimes transitório e permanente mostrou que a maior demanda energética ocorre durante o aquecimento do reator. O conceito de processo de rendimento energético adotado indica que existe um ponto de equilíbrio entre tempo e

temperatura para obter um melhor rendimento. Mais estudos devem ser realizados para encontrar o ponto ideal de torrefação.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte financeiro ao projeto 406696/2013-6. A Fundação Amazônia Paraense de Amparo À Pesquisa -FAPESPA e VALE S.A. pelo suporte financeiro ao projeto 108806/2012. Ao professores Patrick Rousset (CIRAD, França) e Luciane Batistella UNIFESSPA, pelo auxílio nas diversas questões do laboratório.

6. Referências

- Basu, Prabir. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. Academic press, 2013.
- Ben, Haoxi; RAGAUSKAS, Arthur J. **Torrefaction of Loblolly pine**. *Green Chemistry*, v. 14, n. 1, p. 72-76, 2012.
- Bissen, D. **Biomass densification, document of evaluation**. Agricultural Utilization Research Institute, Minneapolis: Zachry Energy Corporation, 2009.
- Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I., & Williams, P. T. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. **Fuel**, 87(6), 844-856, 2008.
- Chen, W. H., Peng, J., & Bi, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 44, 847-866, 2015.
- Chin, K. L., H'ng, P. S., Go, W. Z., Wong, W. Z., Lim, T. W., Maminski, M., & Luqman, A. C. Optimization of torrefaction conditions for high energy density solid biofuel from oil palm biomass and fast-growing species available in Malaysia. **Industrial crops and products**, 49, 768-774, 2013.
- Covert, Thomas, Michael Greenstone, and Christopher R Knittel. 2016. "Will We Ever Stop Using Fossil Fuels?" **Journal of Economic Perspectives** 30 (1): 117–38. <https://doi.org/10.1257/jep.30.1.117>.
- CPFL. 2023. **Tarifas CPFL Empresas Paulista**. 2023. <https://www.cpfl.com.br/empresas/tarifas-cpfl-paulista>.
- Doassans-Carrère, N., Muller, S., & Mitzkat, M. REVE—a new industrial technology for biomass torrefaction: pilot studies. **Fuel Processing Technology**, 126, 155-162, 2014.
- Dong, Kangyin, Gal Hochman, Yaqing Zhang, Renjin Sun, Hui Li, and Hua Liao. CO₂ Emissions, Economic and Population Growth, and Renewable Energy: Empirical Evidence across Regions. **Energy Economics** 75: 180–92. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.017>.
- Goes, Fábio B., Amaral, Adriene O., Santos, Alisson B. M., Miranda, Kaline F. M., and Santos, Victor Al. H. F. 2023. Natural Regeneration of Commercial Species in Area Submitted to Small-Scale Forest Management in the Middle Amazon. **Nativa** 11 (2): 192–99. <https://doi.org/10.31413/nat.v11i2.14986>.
- Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S., & Madrali, S. Status overview of torrefaction technologies. In **IEA bioenergy task** (Vol. 32, pp. 1-54), 2012.
- Lu, K. M., Lee, W. J., Chen, W. H., Liu, S. H., & Lin, T. C. Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, 123, 98-105, 2012.
- Nahuz, M. A. R. Catálogo de madeiras brasileiras para construção civil. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo**, 2013
- Nhuchhen, D. R., Basu, P., & Acharya, B. A comprehensive review on biomass torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, 2014, 1-56, 2014.
- Schwengber, D. R., SMIDERLE, O. J. Cupiúba *Goupia glabra* Aubl. **INPA**, 2005.
- Silva, D. O. Ferreira, P. H. F., Carneiro, A. N., Oliveira, D. C. and Nogueira, M. F. M. Mapping and definition of operational parameters of an innovative vibrating thermal system for production of torrefacted biomass. **23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2015** Rio de Janeiro, Brazil.

Silva, Dimitri O. *et al.*, *Rev. Energia Am.*, Manaus, v. 01, n. 01, jan-jun, 2024.

Silva, L., Oliveira L., Silva, H., Sousa, P. e Barros, D. 2018. Aproveitamento Energético de Resíduos da Indústria Moveleira. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade** 5 (2): 36–42. <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/RBES/index>.

Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Boardman, R. D., Hess, R. J., & Sokhansanj, S. Review on biomass torrefaction process and product properties and design of moving bed torrefaction system model development. In 2011 Louisville, Kentucky, August 7-10, 2011 (p.1). **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2011a.

Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, 5(6), 683-707, 2011b.

Uemura, Y., Omar, W. N., Tsutsui, T., & Yusup, S. B. (2011). Torrefaction of oil palm wastes. **Fuel**, 90(8), 2585-2591.

Wu, K. T., Tsai, C. J., Chen, C. S., & Chen, H. W. (2012). The characteristics of torrefied microalgae. **Applied energy**, 100, 52-57.



A ENGENHARIA DE PETRÓLEO E GÁS NO AMAZONAS E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

OIL AND GAS ENGINEERING IN THE AMAZONAS AND THE ENERGY TRANSITION: CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

Joemes de Lima Simas^{1*}, Ana Carolina Monte Almeida², Fernando Gadelha de Abreu³,
Robertom Guedes do Amaral⁴

^{1,2,3,4}Universidade Federal do Amazonas, FT/DEPEG, Manaus/AM, Brasil.
E-mail: joemes@ufam.edu.br

Resumo

A engenharia de petróleo desempenha um papel indispensável no desenvolvimento da sociedade moderna, impulsionando a economia global e satisfazendo a crescente demanda por energia. No entanto, à medida que o mundo enfrenta desafios ambientais e busca uma transição energética para fontes mais limpas e sustentáveis, a engenharia de petróleo enfrenta uma série de mudanças significativas, especialmente em regiões como o Estado do Amazonas que apresenta cenários complexos, principalmente envolvendo questões ambientais, logísticas e regulatórias. Este artigo explora a interseção entre a engenharia de petróleo e a transição energética, destacando os desafios e oportunidades que surgem nesse contexto. A engenharia de petróleo desempenha um papel crucial na formação do mundo moderno, mas à medida que a sociedade avança em direção a fontes de energia mais limpas e sustentáveis, os engenheiros de petróleo enfrentam desafios e oportunidades significativas. A transição energética exige que eles se adaptem, diversifiquem e inovem em suas práticas e conhecimentos. Ao fazê-lo, podem desempenhar um papel vital na busca por um futuro energético mais sustentável e na redução dos impactos ambientais da indústria de petróleo. A colaboração entre profissionais da engenharia de petróleo e gás e especialistas em energia renovável é fundamental para enfrentar os desafios da transição energética de forma eficaz e criar um mundo mais sustentável.

Palavras-Chave: Transição Energética. Engenharia de Petróleo e Gás. Amazonas.

Abstract

Petroleum engineering plays an indispensable role in the development of modern society, driving the global economy and satisfying the growing demand for energy. However, as the world faces environmental challenges and seeks an energy transition to cleaner and more sustainable sources, petroleum engineering faces a series of significant changes, especially in regions such as the State of Amazonas, which presents complex scenarios, mainly involving issues environmental, logistical and regulatory. This article explores the intersection between petroleum engineering and the energy transition, highlighting the challenges and opportunities that arise in this context. Petroleum engineering plays a crucial role in shaping the modern world, but as society moves toward cleaner, more sustainable energy sources, petroleum engineers face significant challenges and opportunities. The energy transition requires them to adapt, diversify and innovate in their practices and knowledge. In doing so, they can play a vital role in pursuing a more sustainable energy future and reducing the environmental impacts of

the petroleum industry. Collaboration between oil and gas engineering professionals and renewable energy experts is critical to effectively addressing the challenges of the energy transition and creating a more sustainable world.

Keywords: Energetic Transition. Oil and Gas Engineering. Amazonas.

1. Introdução

A extração de hidrocarbonetos tem sido uma atividade essencial para produção de energia em escala mundial, alimentando a economia e indústrias. Por outro lado, essa atividade se destaca negativamente pelo grande impacto no meio ambiente, contribuindo para a emissão de gases de efeito estufa e deterioração ambiental (Li *et al.*, 2023).

No Amazonas a exploração de óleo e gás natural teve início em 1986, em Coari, a cerca de 650 quilômetros da cidade de Manaus. Essa atividade proporcionou grandes impactos positivos na região, aumentando exponencialmente o desenvolvimento econômico e social. Atualmente ainda é crescente a perspectiva da exploração na região, principalmente com as instalações de novas empresas produtoras de gás natural, consolidando a região como um pólo em ascensão nesse setor, além da iniciação da fase de exploração na denominada margem Equatorial (bacias marítimas da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar).



Figura 1. Base de operações em Urucu, Amazonas.

Fonte: VEJA (2011).

O grande desafio das empresas exploradoras de óleo e gás natural, entretanto, reside no cenário atual de transição energética, principalmente pela alta demanda global por fontes de energia sustentáveis, tornando-se prioridade a formulação de estratégias que promovam uma transição gradativa. Corroborando com essa ideia, Morgunova e Shaton (2022) mencionam que

o processo de transição energética dependerá, significativamente, de como a indústria petrolífera responderá a essas questões emergenciais relacionadas a soluções de sustentabilidade.

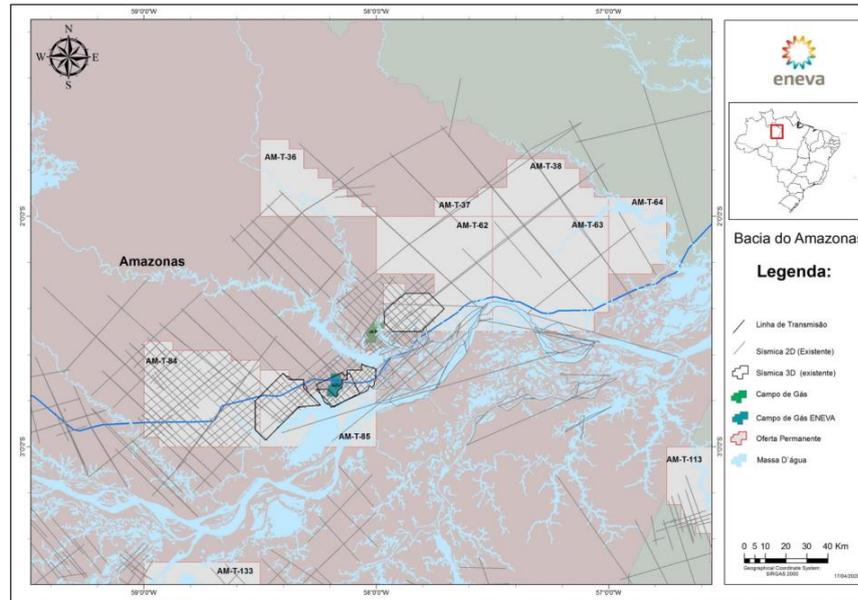


Figura 2. Mapa da Bacia do Amazonas.

Fonte: Eneva (2020).

Neste paradoxo entre a alta demanda pela utilização de combustíveis fósseis e a necessidade de transição energética global, a educação na engenharia de petróleo também necessita de revisões e atualizações, mantendo conteúdos primários nas áreas centrais de energia (geração e armazenamento – petróleo, gás, fontes geotérmicas naturais e projetadas), aspectos de geologia e geofísica (geociências), fluxo químico e ambiental (refinaria, oleoduto, controles ambientais, instalações de superfície, etc.), armazenamento subterrâneo de qualquer tipo de material (gases de efeito estufa) e energia (ar comprimido e armazenamento de hidrogênio), e atividades subterrâneas não petrolíferas (hidrogeologia, eliminação de resíduos) (Babadagli, 2023).

De acordo com Ershaghi e Paul (2020) essa transformação da cadeia energética também promoverá novas oportunidades na área de atuação para os engenheiros de petróleo, desde a reorientação e adequação das estruturas subterrâneas para armazenamento de diferentes materiais como gás natural, petróleo, ar comprimido, hidrogênio e dióxido de carbono, na recuperação de fluidos geotérmicos como fonte de energia não hidrocarbonadas e no gerenciamento da recuperação de águas doces subterrâneas.

O objetivo principal deste artigo de revisão concentra-se na contribuição para a literatura atual sobre transição energética, estratégias e percepções na indústria do petróleo e os desafios e oportunidades para a engenharia de petróleo e gás natural no Amazonas.

2. Metodologia

Para a elaboração deste artigo optou-se pela abordagem da pesquisa bibliográfica, que envolveu análise de fontes literárias, principalmente livros e artigos científicos (SCIENCE DIRECT, GOOGLE SCHOLAR, SCOPUS, SPRINGER, CAPES), relatórios executivos (ANP, ENEVA, CIGÁS, IEA), resoluções (LEI N. 5.496, DE 14 DE JUNHO DE 2021) e publicações relacionadas ao tema (teses, dissertações), além da experiência adquirida com a implantação do curso de Engenharia de Petróleo e Gás no Amazonas.

Dessa forma, neste artigo consolidou-se os principais tópicos da transição energética, do papel da engenharia de petróleo e gás no Amazonas e a indústria petrolífera na região.

2.1 Transição Energética

Na engenharia, o conceito de transição energética refere-se a uma mudança, não apenas da fonte da matriz energética, mas também nos sistemas de produção, distribuição e consumo de energia, com o objetivo de torná-los mais sustentáveis, eficientes e ambientalmente aceitáveis. Buscando reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis, como combustíveis fósseis, e promover a adoção de fontes renováveis e tecnologias mais limpas.

Historicamente, o primeiro processo de transição energética registrado no mundo, e impulsionado pela necessidade de acelerar a industrialização, envolveu a substituição do carvão para o petróleo e gás natural e o processo de transição atual envolve migração dos hidrocarbonetos para fontes de energéticas renováveis (Chipangamate e Nwaila, 2024 e Li et al., 2023).

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2021), as emissões de dióxido de carbono, medida em gramas de dióxido de carbono por megajoule (gCO₂/MJ), têm crescido de maneira muito acelerada em países em desenvolvimento. O estudo aponta que as emissões de CO₂ provenientes da utilização de óleo e gás natural terão maior intensidade até o ano de 2050, chegando a 60 gCO₂/MJ. Já as emissões referentes à utilização de fontes de energias renováveis tendem a aumentar de maneira exponencial, tendo seu ápice de aproximadamente 50 gCO₂/MJ no mesmo ano.

A transição energética na engenharia é um desafio complexo, mas é crucial para enfrentar os desafios ambientais e climáticos associados ao consumo de energia não sustentável.

2.2. A Engenharia de Petróleo e Gás Natural no Norte do Brasil.

Atualmente o norte do Brasil conta com dois cursos de bacharelado dedicados à Engenharia de Petróleo e Gás Natural.

Na Universidade Federal do Amazonas (UFAM), o Curso de Engenharia de Petróleo e Gás foi criado pela Resolução nº 045, de 01 de outubro de 2009 do Egrégio Conselho Universitário (CONSUNI) e é integrado a Faculdade de Tecnologia FT/UFAM, de acordo com o Programa de Apoio a Planos de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais (Reuni) e já conta com mais de 150 profissionais formados.

Já na Universidade Federal do Pará (UFPA), a criação do curso de Engenharia de Exploração e Produção de Petróleo, no Campus Universitário de Salinópolis, foi aprovada pela Resolução Nº 4.563 de 28 de Agosto de 2014 pelo Conselho Superior da UFPA.

A existência do curso de engenharia de petróleo no Estado do Amazonas oferece oportunidade única para a utilização da mão de obra local, essa realidade proporciona vantagens significativas, reduzindo a dependência de profissionais de outras regiões e contribuindo para o desenvolvimento econômico sustentável da área.

2.3. Indústria Petrolífera no Amazonas

Na região Norte do Brasil, a Bacia do Amazonas destaca-se como pioneira na exploração de petróleo. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em seu relatório de 2021, as atividades de pesquisa tiveram início por volta de 1917, conduzidas pelo Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil (SGMB). As operações de perfuração, por sua vez, remontam de 1925, quando foram identificados os primeiros indícios de óleo e gás natural na região.

Ainda de acordo com os dados disponíveis pela ANP estão previstos, para o ano de 2024, cerca de US\$1,96 bilhões para investimentos na fase de exploração de petróleo e gás natural. Somente para investimentos na exploração da Margem Equatorial a previsão é de cerca de US\$1,09 bilhão, correspondendo a aproximadamente 55,61 % do montante total. Nesta fase, as empresas realizam estudos e atividades, como levantamentos sísmicos e perfuração de poços exploratórios, para detectar a presença de hidrocarbonetos em quantidades economicamente viáveis (ANP, 2024).

Mais recentemente a empresa responsável pela maior parte da produção de gás natural no Estado, anunciou a comercialidade de três novos campos, dois deles no Amazonas. O Campo de Tambaqui, com volume estimado de gas-in-place de até 3,6 Bm³ e total de óleo e condensado

estimado de 13,9 MMBIs e também o Campo de Azulão Oeste, com estimativa de gas-in-place de 2,3 Bm³, de acordo com os relatórios executivos de auditoria das reservas e recursos de campos, em 2023.

3. Resultados e Discussão

3.1 Desafios e Oportunidades

Dentre os Desafios da Transição Energética para a Engenharia de Petróleo e Gás no Amazonas, destacam-se (Lima, 2022):

Redução das Emissões de Carbono: A principal preocupação da transição energética é reduzir as emissões de carbono. A indústria de petróleo é uma grande fonte dessas emissões devido à queima de combustíveis fósseis. Os engenheiros de petróleo precisam desenvolver tecnologias mais limpas e eficientes para reduzir o impacto ambiental da produção e consumo de petróleo.

Diversificação de Fontes de Energia: À medida que as fontes de energia renovável, como a solar e eólica, ganham espaço, os engenheiros de petróleo precisam adaptar suas habilidades para trabalhar em setores relacionados à energia limpa. Isso pode incluir a gestão de infraestruturas para armazenamento de energia e a integração de sistemas de energia sustentável.

Tecnologias de Carbono Zero: A captura e armazenamento de carbono (CAC) é uma área de pesquisa e desenvolvimento fundamental para a indústria de petróleo. Os engenheiros de petróleo e gás podem desempenhar um papel vital no desenvolvimento de tecnologias CAC eficazes, ajudando a reduzir as emissões de gases de efeito estufa associadas à queima de combustíveis fósseis.

Além disso, como oportunidades na Transição Energética para a Engenharia de Petróleo e Gás podemos destacar (Gabrielli, 2020):

Reciclagem de Conhecimento: Os engenheiros de petróleo e gás têm habilidades valiosas em geologia, geofísica e engenharia de reservatórios. Essas habilidades podem ser aplicadas na identificação e desenvolvimento de recursos geotérmicos, armazenamento subterrâneo de energia e até mesmo na gestão de projetos de infraestrutura para energia renovável.

Exploração de Novos Mercados: À medida que a indústria de petróleo enfrenta desafios, as empresas do setor estão diversificando seus investimentos em energia renovável. Isso cria oportunidades para engenheiros de petróleo e gás se envolverem em projetos de energia solar, eólica e de armazenamento de energia.

Inovação Tecnológica: A engenharia de petróleo sempre foi caracterizada por sua inovação tecnológica. Os engenheiros de petróleo e gás podem aplicar essa mentalidade inovadora para criar soluções mais eficazes e sustentáveis para os desafios da transição energética.

4. Conclusões

O paradoxo é evidente, ao mesmo tempo que a engenharia de petróleo gera energia que não provém de fontes limpas e renováveis, paralelamente precisa buscar alternativas para superar os dilemas e dificuldades da transição energética, que busca por fontes de energia limpa, o que torna o desafio ainda mais crítico, mas não impossível.

No Amazonas, onde o cenário complexo da região é um fator agravante da dificuldade de adaptação, uma vez que envolve vários desafios logísticos, regulatórios e principalmente ambientais, o que leva aos engenheiros de petróleo a elaborarem abordagens inovadoras e adaptativas. Os novos interesses e investimentos destacam ainda mais a importância da região como um polo em ascensão, o que implica afirmar que a formação dos novos profissionais desta indústria deve ser um tanto mais ampla para as atuais necessidades, assim como os profissionais já atuantes devem buscar conhecimento para atender a atual demanda de maneira satisfatória.

A colaboração entre os profissionais da indústria do petróleo e os especialistas em energias renováveis deve ser ampliada, tornando o equilíbrio sustentável para ambas as partes, além do que os engenheiros de petróleo podem se posicionar como agentes de mudança e transição energética, superando obstáculos e, por fim, o principal objetivo: a sustentabilidade global.

6. Referências

Abraham-Dukuma, M. C. Dirty to clean energy: Exploring 'oil and gas majors transitioning'. **The Extractive Industries and Society**, v. 8, n. 3, p. 100936, 2021.

ANP. Brasil. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/investimentos-em-exploracao-podem-chegar-a-us-1-96-bilhao-em-2024. Acesso em: 23/01/2024

Babadagli, T. Reassessment of petroleum engineering education: Is it the end of an era or a new start? **Education for Chemical Engineers**, v. 43, p. 1-9, 2023.

Base de operações em Urucu estado do Amazonas. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/petrobras-encontra-novos-indicios-de-petroleo-na-amazonia>

Chipangamate, N.; Nwaila, G. Assessment of challenges and strategies for driving energy transitions in emerging markets: A socio-technological systems perspective. **Energy Geoscience**, v. 5, 2024.

Ershaghi, I.; Paul, D. L. Engineering the Future of Petroleum Engineering and Geoscience Graduates. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Virtual, 2020.

Gabrielli de Azevedo, J. S. O petróleo vai acabar? Controvérsias sobre pico de produção e transição energética. Texto para Discussão / Instituto de Estudos Estratégicos de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Rio de Janeiro: Inep, 2020. ISSN 2595-8232.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Net Zero by 2050. 4º revisão, outubro de 2021. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf. Acesso em: 18/02/2024.

Leão, R. P. F.; Nozaki, W. Chaves, A. C.; Coutinho, I.; Rodrigues, R. A geopolítica do petróleo e do gás natural no contexto da transição energética: um processo de transição justa? Texto para Discussão / Instituto de Estudos Estratégicos de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – Rio de Janeiro: Inep, 2021. ISSN 2595-8232.

Li, N.; Dilanchiev, A.; Mustafa, G. From oil and mineral extraction to renewable energy: Analyzing the efficiency of green technology innovation in the transformation of the oil and gas sector in the extractive industry. **Resources Policy**, v. 86, Part A, 2023.

Lima, L. J. B.; Hamzagic, M. Estratégias para a transição energética: revisão de literatura. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano. 07, Ed. 06, Vol. 08, pp. 96-120. Junho de 2022. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/>

Morgunova, M.; Shaton, K. The role of incumbents in energy transitions: Investigating the perceptions and strategies of the oil and gas industry. **Energy Research & Social Science**, v. 89, p. 102573, 2022.

Relatórios de Certificação de Reservas. Disponível em: <https://ri.eneva.com.br/informacoes-ao-mercado/relatorios-de-certificacao-de-reservas-e-recursos/>. Acesso em 18/02/2024.

Santos, C. M. dos; Braga, A. L. de C.; Santos, J. M. dos; Oliveira, M. B. de; Madureira, M. T. A indústria do petróleo e energia frente aos novos desafios de se inserir nos modelos da transição energética. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, 2022 ISSN 2525 DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32000>.



GESTÃO ENERGÉTICA MUNICIPAL E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

MUNICIPAL ENERGY MANAGEMENT AND ENERGY TRANSITION IN THE BRAZILIAN AMAZON

Rubem Cesar Rodrigues Souza^{1*}, Thainara Costa da Silva², Karen Barbosa de Melo², José Maria Ypiranga de Carvalho², Márcia Drumond Sardinha¹

¹Universidade Federal do Amazonas, Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico, Manaus/AM, Brasil. E-mail: rubem@ufam.edu.br

²Instituto Energia e Desenvolvimento Sustentável, Manaus, AM, Brasil.

Resumo

A atual transição energética é um processo que exige o comprometimento dos setores público e privado de sorte a suplantar grandes dificuldades e atingir, de forma justa e sustentável, a economia de baixo carbono. De outra sorte, inúmeras são as oportunidades que já surgiram e que ainda irão surgir do ponto de vista econômico, social e também de aperfeiçoamento da máquina pública. Neste artigo é feita uma reflexão acerca do papel da gestão pública municipal no tocante à transição energética, apresentando uma proposta de gestão energética municipal que se considera apropriada para o cenário amazônico brasileiro, de sorte a empoderar esse ente federativo, tirando-o da condição de coadjuvante e elevando-o para a categoria de protagonista no cenário energético. Resgata-se, ainda, uma experiência de modelo de negócio de energia elétrica para suprimento de comunidades isoladas da Amazônia brasileira, passível de ser implementada pela gestão pública municipal trazendo resultados mais alvissareiros do que os obtidos pelas políticas do governo federal e com potencial real de promoção de desenvolvimento socioeconômico regional em bases sustentáveis.

Palavras-Chave: Transição Energética. Amazônia. Gestão energética municipal. Comunidades isoladas.

Abstract

The current energy transition is a process that requires the commitment of the public and private institutions in order to overcome major difficulties and achieve, in a fair and sustainable way, a low-carbon economy. Otherwise, there are countless opportunities that have already emerged and will still emerge from an economic, social point of view and also for the improvement of the public sector. In this paper, a reflection is made on the role of municipal public management in relation to the energy transition, bringing to the fore a proposal for municipal energy management that is considered appropriate for the Brazilian Amazonian scenario, in order to strengthen this between federative, removing it from the condition supporting role and elevating him to the category of protagonist in the energy scenario. An experience of an electrical energy business model for supplying isolated communities in the Brazilian Amazon is also revived, capable of being implemented by municipal public management, bringing more promising results than those obtained by federal government policies and with real potential for promotion of regional socioeconomic development on a sustainable basis.

Keywords: Energy Transition. Amazon. Municipal energy management. Isolated communities.

1. Introdução

A transição energética vivenciada na atualidade apresenta características bem distintas das demais sendo esta pautada pela questão ambiental, porém, alicerçada no novo cenário tecnológico e também por demandas da sociedade que podem ser sintetizadas pelos objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas. Portanto, há que se observar para além da substituição de combustíveis fósseis por renováveis, avançando na descentralização da geração de energia, na democratização do serviço de energia elétrica, na descarbonização de cadeias produtivas, na criação de novos modelos de negócios e, na maior penetração da digitalização para avançar na gestão e otimização das cadeias produtivas de energia.

Para obter resultados significativos para a sociedade faz-se necessário que os setores público e privado, em todas as suas esferas, estejam não somente envolvidos, mas fortemente comprometidos e devidamente capacitados e aparelhados.

Diferentemente do caso brasileiro, inúmeras são as experiências internacionais em que o planejamento do setor energético se dá de forma descentralizada, com forte comprometimento da administração pública municipal. Tem-se, por exemplo, a publicação de guias orientativos desenvolvidos por entidades que buscam auxiliar os governos municipais, dentre os quais se pode citar a publicação de Genchev *et al.* (2010), que se constitui em um guia desenvolvido pelo Bulgarian Centre for Energy Efficiency (EnEffect), no âmbito do projeto *Management of Domains related to Energy in Local authorities* (MODEL), financiado pela Comissão Europeia no âmbito do Programa Energia Inteligente. A metodologia desenvolvida é chamada de *Common Framework Methodology* (CFM) destinada ao planejamento energético. A metodologia foi testada em projetos pilotos em 43 municípios e seus princípios básicos foram acordados por todos os parceiros do Projeto MODEL.

Tem-se também a obra da European Commission (2014), na qual são apresentadas diretrizes metodológicas para o desenvolvimento de Comunidades e Sistemas de Energia Sustentável em áreas urbanas descentralizadas da Região Mediterrânea. Essas diretrizes foram criadas no âmbito do projeto *Energy Actions and Systems* (EASY), que visa facilitar a transferência de estratégias para a mitigação de emissões de nível global para local, através da execução de várias ações que definem um modelo de sistema energético baseado na

maximização da eficiência energética, no uso de recursos renováveis e em uma forte participação das comunidades locais.

Há também o trabalho da APSE (2015), desenvolvido para apresentar aos líderes de conselho (administradores locais) e formuladores de políticas públicas no âmbito do Reino Unido, as recompensas econômicas decorrentes da administração energética municipal, com estudos de caso.

Trabalho recente apresentado por Kaselofsky *et al.* (2021) apresenta o resultado da implantação de Sistema de Gestão Energética em 28 municípios europeus, sendo que ao final 78% conseguiram obter a certificação ISO 50001.

Ao se lançar o olhar sobre o cenário energético na Amazônia brasileira verifica-se um contingente populacional sem acesso ao suprimento de energia elétrica, fazendo uso de fogões a lenha de baixíssima eficiência e praticando atividades de subsistência. Conclui-se, portanto, pela ineficácia das políticas públicas que objetivavam alterar esse quadro, tais como o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios – PRODEEM e o Programa Luz para Todos. Associado a este quadro, tem-se as administrações públicas estaduais e municipais atuando como coadjuvantes, à mercê de planos elaborados fora da região e sem a devida leitura da problemática a ser trabalhada, o que tem levado a ações equivocadas.

Neste trabalho é apresentado um caminho alternativo para solução dessa problemática passando esta pelo comprometimento das administrações públicas locais e pela adoção de projetos que visem para além da eletrificação rural.

2. Metodologia

O trabalho em tela foi desenvolvido valendo-se de pesquisa bibliográfica, que consiste na revisão da literatura relacionada à temática abordada e na leitura e interpretação de material disponível em várias fontes de informação. Assim, foram utilizadas informações contidas em periódicos e sites dentre outras fontes.

Foi de fundamental importância para o desenvolvimento deste artigo a experiência dos autores na construção da proposta de sistema de gestão energética local, bem como, com a expertise adquirida na concepção e implementação do projeto adotado como passível de ser implementado pela gestão pública local no contexto das comunidades isoladas da Amazônia brasileira aqui apresentado.

3. Comunidades isoladas na Amazônia

Ao se referir ao setor elétrico na região amazônica brasileira, Souza (2000) o subdividiu em três tipos, quais sejam, o mercado das “capitais” que atualmente estão conectadas ao Sistema Interligado Nacional – SIN, com exceção de Boa Vista-RR; o mercado elétrico “concentrado”, suprido pelos denominados Sistemas Elétricos Isolados, com forte predomínio de geradores a óleo diesel, representado pelas áreas urbanas dos municípios do interior dos estados e pequenas localidades, cuja manutenção e operação, atualmente, está a cargo de produtores independentes de energia e a comercialização da eletricidade é responsabilidade de uma concessionária. Tem-se ainda, o denominado mercado “disperso”, representado por parte da população que não tem acesso à eletricidade ou possuem pequenos geradores a diesel para funcionamento durante poucas horas diárias à custa de cota entre os moradores. A população no mercado disperso consome vela e querosene para iluminação, faz uso de fogões a lenha de baixa eficiência, não tem acesso à água potável e a situação sanitária é precaríssima.

De modo a evidenciar a necessidade de abordagem diferenciada no âmbito do denominado mercado disperso, Souza (2000) o subdivide nos seguintes grupos:

Grupo I: Populações tradicionais, tais como, seringueiros, pescadores, etc.

Grupo II: Populações tradicionais, tais como, seringueiros, ribeirinhos, extrativistas, etc., que habitam áreas de Reserva Extrativista, Reserva de Fauna e Reserva de Desenvolvimento Sustentável, incluídas nas unidades de uso sustentável.

Grupo III: Populações alocadas em área de reforma agrária.

Grupo IV: Populações de reservas indígenas.

Grupo V: Populações que não se enquadram nos grupos anteriores.

O mesmo autor afirma que os grupos I e II possuem em comum o desenvolvimento de atividade econômica que lhes é suficiente para manter somente a sobrevivência e que necessita de apoio para aprimorar as técnicas adotadas nas atividades econômicas e assim, criar condições para garantir a produção de excedentes, bem como de infraestrutura para suprir mercados vizinhos. Há instrumentos regulatórios ambientais somente para o Grupo II, que estabelecem regras para o modelo de desenvolvimento dessas comunidades. As populações enquadradas no

Grupo III distinguem-se das demais por serem contempladas por instrumentos legais que estabelecem incentivos para o desenvolvimento das condições necessárias para o crescimento econômico, cabendo a um ente federal específico as políticas de desenvolvimento delas. Esses grupos também são enquadrados em legislação ambiental, porém tais instrumentos não contemplam regras para o desenvolvimento econômico de maneira tão enfática como para as populações do Grupo II. Para as populações do Grupo IV existe legislação específica que estabelece regras para atividades econômicas e de características da infraestrutura necessária para o desenvolvimento dessas populações. No Grupo V tem-se aquelas populações que desenvolvem atividade de subsistência não tradicional, as quais não são contempladas por instrumentos regulatórios de natureza ambiental específicos, e também não se enquadram em políticas de incentivos para o desenvolvimento socioeconômico.

Esses grupos, apesar das diferenças mencionadas, apresentam em comum a carência não só de eletricidade, mas também de educação, saúde, infraestrutura para produção, capacitação para produção, transporte, etc.

O cenário descrito por Souza (2000) persiste até os dias atuais. De acordo com IEMA (2020), há aproximadamente 500 mil pessoas sem acesso ao serviço de energia elétrica na Amazônia Legal. Desse total, aproximadamente 51% residem em terras indígenas, territórios quilombolas, unidades de conservação e assentamentos rurais. Vale ressaltar que os autores da publicação afirmam que há imprecisões no estudo e que os números carecem de levantamento de campo.

Considerando a metodologia adotada, pautada, principalmente, em dados públicos normalmente imprecisos e estimativas de crescimento populacional, é muito provável que os levantamentos de campo levarão a números superiores aos apresentados no estudo do IEMA.

4. Gestão energética municipal no Brasil

No Brasil o planejamento energético se dá de forma centralizada, sem a participação ativa de estados e municípios. Estes, por sua vez, geralmente, não possuem em sua infraestrutura administrativa um ambiente adequado para conceber políticas locais, e tampouco, elaborar e executar um planejamento energético municipal. Tal cenário, também se verifica, na maioria das administrações públicas em nível estadual.

Historicamente pouca notícia se tem acerca de ações estruturantes em nível municipal quando se trata do setor energético brasileiro. Políticas energéticas municipais, quando existem, não são emanadas de um ambiente institucional adequado e/ou, quase sempre, são minimalistas e sem continuidade. Nesse contexto, Collaço e Bermann (2017, pg. 222), assim se posicionam:

No Brasil o tema ainda é pouco explorado, sendo tratado de uma perspectiva reducionista e segmentada. A GEDM (Gestão Energética Descentralizada Municipal) está restrita basicamente a ações de eficiência energética dentro dos setores econômicos, com foco majoritário na troca de equipamentos, ou tem como finalidade servir de exemplos de boa gestão.

Collaço e Bermann (2017, p. 222), identificaram, à época, somente duas experiências brasileiras passíveis de registro, quais sejam:

I – O Planejamento Energético Municipal existente no RS ocorrido no período de 1987 a 1994, focando ações de diagnóstico energético dos municípios, com previsão de ações em GEM (Gestão Energética Municipal) tanto pelo lado da oferta (busca por potencialidades e mapeamento dos recursos energéticos disponíveis localmente e incentivo ao desenvolvimento das fontes renováveis locais), quanto pelo lado da demanda (estudo do potencial de racionalização da energia elétrica), além do incentivo ao engajamento e participação popular e dos vários setores municipais envolvidos nas questões energéticas no nível local e;

II – O Planejamento Energético Municipal incentivado pelo subprograma Procel-GEM, vigente até hoje e criado em 1996, com participação de 519 municípios em 19 estados (2016, dados Procel), com foco exclusivo no setor público municipal.

No tocante ao Procel-GEM, em 2018 Júnior (2018, p. 3) assim se refere ao mesmo “... por falta de continuidade nos investimentos, o Procel GEM sofreu uma forte desaceleração, ficando o mesmo quase que esquecido e sem ações efetivas atuais”.

Para além das ações mencionadas merece registro a Plataforma Enerflix do Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID, lançada em 2021, para auxílio aos municípios. De acordo com BID (2024), a Plataforma oferece cursos *on line* gratuitos de eficiência energética

para edificações e iluminação pública e, também, de Geração Distribuída – GD fotovoltaica. Os módulos constantes da plataforma são descritos a seguir:

- **Treinamento:** são disponibilizados vídeos com o conteúdo do curso. São realizadas avaliações de aprendizado no nível inicial, básica e plena. A partir da avaliação inicial o interessado é direcionado para fazer o curso no nível Básico ou Pleno. Para cada treinamento também é disponibilizado um e-book.
- **Ferramentas de avaliação:** O módulo se destina a fazer o estudo de pré-viabilidade econômica de ações de eficiência energética e GD nas áreas contempladas no treinamento. Como resultados são apresentados o investimento necessário, o potencial de economia em valor monetário e energia, o tempo de retorno do investimento (*payback*), a taxa interna de retorno e, especificamente para sistemas fotovoltaicos, o potencial de geração de energia.
- **Projetos:** O módulo se destina à elaboração de projetos mais detalhados de eficiência energética e GD. Para tal é ensinado como identificar o problema, fazer o dimensionamento e orçamento do Projeto Básico, fazer a análise de viabilidade econômica do Projeto Básico, além de ensinar a fazer o planejamento físico e financeiro. O módulo indica também linhas de financiamento para projetos de eficiência energética e GD.

O Ministério de Minas e Energia é responsável pelo Observatório de Inovação para Cidades Sustentáveis – OISC, com participação do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE. De acordo com CGEE (2024), o observatório é “... *uma plataforma colaborativa de mapeamento e divulgação de soluções urbanas inovadoras contextualizadas ao território nacional por meio de tipologia de cidades-regiões*”.

Na Plataforma são disponibilizados os seguintes conteúdos:

- **Soluções:** as soluções se constituem em modelos replicáveis de alternativas sustentáveis para os desafios urbanos, quais sejam: mobilidade, energia, saneamento – resíduos sólidos, soluções baseadas na natureza, ambiente construído e saneamento – água e;
- **Mapa interativo** – a navegação do mapa é feita fazendo escolha da solução desejada, quando então é apresentada no mapa do Brasil, os locais onde a ação foi realizada. Ao clicar sobre o local é apresentada uma descrição do projeto.

O observatório também oferece cursos diversos no âmbito do denominado Ciclo de Formação OICS: sustentabilidade e inovação para gestão e planejamento de cidades; destinados

a gestores públicos para que estes possam usar os recursos da plataforma em benefício dos locais onde atuam.

Há que se registrar também o Guia Prático para a preparação de investimentos urbanos desenvolvido no âmbito do Programa Financing Energy for Low - Carbon Investment - Cities Advisory Facility (FELICITY).

De acordo com MME (2024),

O Guia FELICITY tem como objetivo facilitar a preparação de investimentos em eficiência energética (EE) e geração distribuída (GD) em edificações públicas, a partir da experiência obtida durante a cooperação com parceiros locais. A publicação apresenta o ciclo de preparação de um projeto dentro da administração pública destacando os principais pontos a serem considerados na elaboração de projetos financiáveis com ênfase a escolas e hospitais.

O Guia tem como foco a viabilização de projetos de Eficiência Energética e de Geração Fotovoltaica Distribuída, tendo as edificações como ambiente de aplicação dos projetos.

Como se pode observar, as experiências de Gestão Energética Municipal desenvolvidas no Brasil não contemplam ações relacionadas com a estruturação e sustentabilidade da governança energética em nível local, sendo estas, quase sempre negligenciadas. Deve-se registrar que no Procel-GEM há a exigência de um decreto municipal para criar a Unidade de Gestão Municipal, o que não assegura o envolvimento do poder legislativo e tampouco da comunidade em geral sendo, portanto, um instrumento legalmente frágil uma vez que a manutenção e execução do decreto está à mercê exclusivamente da vontade do chefe do executivo local.

5. Proposta de Gestão Energética Municipal

Entende-se que a participação protagonista da administração pública municipal é imprescindível para que haja o desenvolvimento do setor energético local alicerçado nos ODS e que problemáticas que historicamente persistem possam ser suplantadas, tais como as descritas neste artigo.

A proposta de gestão energética local defendida neste artigo está contida na publicação intitulada Políticas Energéticas Regionais: Guias para internalizar o uso de energias renováveis e eficiência energética na gestão pública, desenvolvida pelo Instituto Energia e

Desenvolvimento Sustentável – INEDES sob os auspícios da WWF-Brasil, disponível livremente no site www.inedes.org.br.

É mister destacar que, embora o título remeta à internalização de fontes renováveis e eficiência energética na gestão pública, os guias transcendem em muito este tema, propondo um processo de empoderamento do poder público local no tocante ao setor energético em geral.

A seguir apresenta-se o conteúdo da referida obra, de acordo com Souza *et al.* (2021).

- Tema 1: Governança local

A estruturação da governança local está contida no guia 1 consistindo nas seguintes ações:

- ✓ **Ação 1:** Instituição do marco da política energética local. O marco legal deverá ser firmado a partir de lei municipal. O guia apresenta uma proposta de processo para elaboração do projeto de lei, bem como, a proposta de minuta de lei do marco da política energética local.
- ✓ **Ação 2:** Constituição do Conselho de Energia Local. A criação do Conselho de Energia deverá ter previsão no marco legal da política energética, bem como, sua composição; devendo ser este um órgão consultivo e deliberativo do poder executivo local quanto à temática energética. A publicação contém uma proposta de Regimento para o Conselho.
- ✓ **Ação 3:** Constituição do Fundo de Energia Local. O Fundo de Energia deverá ser constituído por força de lei específica e deverá estar apto a receber doações. A publicação apresenta uma proposta de organismo gestor do Fundo, bem como, uma proposta de minuta de lei para constituição do Fundo;

- Tema 2: Planejamento Energético Local

Souza *et al.* (2021) apresenta uma proposta de como elaborar o Planejamento Energético local fazendo sua estruturação em eixos e pilares estratégicos em um horizonte a ser definido pelo Conselho de Energia. Os autores sugerem um conjunto de ações que podem ser contempladas no plano de ações.

- Tema 3: Instrumentos legais para internalização de fontes renováveis de energia e tecnologias de eficiência energética.

O tema instrumentos legais está contido no guia dois se constituindo do mecanismo de Parceria Público Privada – PPP e do Registro de Preços. Souza *et al.* (2021) apresentam a base legal para o uso dos referidos instrumentos, bem como, o modelo de toda a documentação que devem instruir tais processos. Foram elaboradas planilhas em Excel[®] para subsidiar a definição

dos preços de referência para projetos de retrofit da iluminação pública e predial e, também, geração distribuída fotovoltaica *on grid* e *off grid*.

A publicação contém, ainda, a indicação de diversas fontes de recursos, bem como, de oportunidades sem ônus para capacitação de recursos humanos tais como a Plataforma Enerflix e o Guia Felicity.

6. Exemplo de modelo de negócio no ambiente de governança energética municipal proposto

Como mencionado anteriormente as ações do poder público no tocante à problemática energética na Amazônia brasileira sempre apresentaram resultados incapazes de transformar a realidade socioeconômica local. Mudar essa realidade implica em atuar diferente envolvendo novos atores e estratégias.

No período de 2005 a 2008, foi desenvolvido, juntamente com outras experiências, o projeto intitulado Modelo de Negócio de Energia Elétrica em Comunidades Isoladas da Amazônia – NERAM, que serviria para subsidiar as ações de universalização do serviço de energia elétrica na Amazônia. Passados mais de 15 anos, não se tem notícias do poder público ter desenvolvido projetos com o mesmo escopo do NERAM e tampouco dos demais que foram desenvolvidos à época. Dentre os fatores que concorrem para a não reprodução dessa experiência reputa-se, principalmente, os seguintes: i) visão reducionista do problema, dado que a questão não consiste, tão somente, em universalizar o serviço de energia elétrica e sim, em desenvolver socioeconomicamente as comunidades; ii) soluções concebidas sem contemplar o aprendizado gerado por outras experiências e a garantia do envolvimento de agentes locais para conceber e implementar as ações e; iii) busca de solução de curto prazo sem estratégias concretas de sustentabilidade no médio e longo prazos.

Entende-se que projetos como o NERAM, o qual será descrito a seguir, são passíveis de serem capitaneados pela gestão municipal desde que esta esteja devidamente instrumentalizada para captar recursos e gerir o processo. Tal assertiva se assenta no fato da administração pública ser a responsável pelas ações de promoção do desenvolvimento local e, portanto, poder transcender o foco de sua atuação para além da questão energética.

6.1 Caracterização da situação problema vivida no projeto NERAM

A questão a ser respondida era: é possível gerar um modelo de negócio de energia elétrica, sem a necessidade de subsídios, passível de replicação que assegure o suprimento elétrico e o

desenvolvimento socioeconômico de comunidades isoladas na Amazônia brasileira? É mister registrar que até hoje os programas governamentais não responderam essa pergunta.

Para responder a essa questão no âmbito do projeto NERAM foram selecionadas comunidades regionais típicas, localizadas no município de Manacapuru-AM a 93 km de Manaus por rodovia. As comunidades contempladas foram São Francisco do Parauá, Cristo Rei, Nossa Senhora da Conceição e Pentecostal do Brasil; localizadas à margem do Rio Solimões com acesso somente por via fluvial, demandando 40 minutos de uma embarcação movida a motor de popa de 40 HP (voadeira) da sede de Manacapuru à comunidade São Francisco do Parauá, onde foi implantada a principal infraestrutura do projeto. Também participou do projeto a comunidade Divino Espírito Santo, localizada no lago do Cururu, distante 30 minutos, por via fluvial, da comunidade de São Francisco do Parauá. É oportuno registrar que, no período de seca do Rio Solimões, o trajeto entre as duas comunidades somente é possível a pé passando pelo leito do Lago do Cururu o que demanda em torno de 3 (três) horas de caminhada em terreno alagadiço.

Todas as comunidades praticavam agricultura de subsistência e o nível de escolaridade era bastante baixo. Estas não eram supridas eletricamente pela distribuidora de energia elétrica e mantinham pequenos grupos geradores a diesel com funcionamento diário de aproximadamente 4 (quatro) horas, desde que fossem capazes de adquirir o óleo diesel e dar manutenção no equipamento, situação essa que quase sempre não era possível. É mister destacar que geradores a diesel são doados, até hoje, por prefeituras ou por candidatos para os cargos públicos municipais em períodos eleitorais.

6.2 O modelo de negócio do projeto NERAM

O modelo de negócio foi alicerçado nos seguintes pilares:

- Empoderamento comunitário. O empoderamento comunitário foi estabelecido via a constituição de uma cooperativa intitulada Cooperativa Energética Agroextrativista Rainha do Açaí - CEARA. A CEARA seria responsável pela agregação dos comunitários objetivando o desenvolvimento de atividades de comercialização, ações sociais e, também, de atração de políticas públicas. Uma vez capitalizada, a Cooperativa poderia entrar com contrapartida financeira para, por exemplo, construção de escolas e postos de saúde.
- Geração de renda. A geração de renda foi assegurada via a construção de uma agroindústria de polpas de açaí, goiaba e maracujá na comunidade de São Francisco do Parauá. Com exceção do açaí, a goiaba e o maracujá já estavam sendo produzidos

e comercializados *in natura* em baixíssima escala. O açaí, proveniente de extrativismo, era fornecido pelos moradores da comunidade Divino Espírito Santo, os quais também se tornaram cooperados. Antes do projeto os comunitários praticavam o escambo. A estratégia de geração de renda consistia em implantar um empreendimento âncora, no caso, a agroindústria e, outros de menor porte contemplando o potencial das comunidades mais distantes. Assim, via recursos de outro projeto, foi implantada uma unidade de produção de farinha de peixe e de mandioca na comunidade de Divino Espírito Santo. Outra oportunidade de geração de renda consistia na venda de energia elétrica para a distribuidora. Essa ação somente poderia ser explorada quando as comunidades fossem eletrificadas o que, segundo o planejamento da distribuidora, seria feito mediante a instalação de um grupo gerador a diesel e a construção de rede elétrica. Para explorar essa oportunidade a CEARA seria habilitada a atuar como autoprodutora de energia e assim, poderia viabilizar a comercialização da energia excedente. Considerando o arcabouço legal da atualidade, essa possibilidade ainda seria possível, além da opção de se valer do sistema de compensação de energia. Vale salientar que todo o empreendimento foi licenciado junto aos órgãos ambientais e ao Ministério da Agricultura.

- Produção de eletricidade por fonte renovável de energia. A eletricidade necessária para a agroindústria foi assegurada via o uso de óleo diesel e o gás produzido pela gaseificação do caroço de açaí, o qual era resíduo do processo produtivo. A eletricidade para o início da produção de polpas foi assegurada por um grupo gerador a óleo diesel. Quando passou a ter disponibilidade de resíduo, ou seja, o caroço de açaí e, portanto, dispor de matéria-prima para produzir o gás combustível, foi feita a modificação do grupo gerador a diesel para bi combustível e passou a ser utilizado o gás da gaseificação juntamente com óleo diesel, priorizando-se o uso total da produção do gás. Dadas as limitações financeiras do projeto, não foi possível instalar um gaseificador de porte adequado à demanda e também não foi feita a substituição do motor de ciclo diesel por um de ciclo Otto o que possibilitaria gerar eletricidade somente com o sistema de gaseificação. Apesar disso, a redução do consumo de diesel, em aproximadamente 50%, impactou favoravelmente no preço das polpas tornando-as bastante competitivas, possibilitando, inclusive, fazer a exportação de 5 toneladas de polpas de açaí.
- Treinamento de comunitários. Os comunitários receberam treinamentos diversos

dentre os quais, cabe destacar os seguintes: informática; boas práticas de produção de polpas; instalações elétricas residenciais; boas práticas de conservação de energia; operação e manutenção de sistema de gaseificação; boas práticas de produção de farinha de peixe e de mandioca; gestão de pequenos empreendimentos; contabilidade básica e cooperativismo.

Vale salientar outras ações que redundaram em benefício para os comunitários, quais sejam:

- Implantação do sistema de internet. Embora esse serviço tivesse restrição de uso, foi possível qualificar mão de obra local para uso de internet e disponibilizar outro meio de comunicação para os comunitários;
- A água tratada para o processo produtivo foi disponibilizada para os comunitários;
- Foi instalado um sistema de gaseificação a carvão vegetal na comunidade Divino Espírito Santo para carregamento de baterias. Esse equipamento estava disponível no Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico – CDEAM da Universidade Federal do Amazonas e foi disponibilizado para vivenciar essa experiência;
- Foram elaborados projetos de sistemas fotovoltaicos individuais para os domicílios, os quais seriam instalados pela distribuidora no âmbito do Programa Luz para Todos, o que não ocorreu. Registre-se que também era compromisso da distribuidora, quando da concepção do projeto, a construção de rede elétrica na comunidade São Francisco do Parauá que seria energizada a partir da energia excedente da agroindústria, o que também não foi levada a efeito.

Estudos visando ampliar e dar sustentabilidade ao projeto foram realizados cabendo destacar os seguintes:

- Levantamento do potencial de produção extrativista de açaí de modo a definir o potencial de crescimento da atividade;
- Identificação de oportunidades de geração de renda em comunidades não contempladas com infraestrutura produtiva local;
- Estudo para plantio de açaí nas proximidades da agroindústria de sorte a reduzir os custos com a logística de transporte e ainda, assegurar a produção de polpa o ano todo.

Visando a manutenção e replicação do projeto foi feita gestão junto à administração pública municipal e estadual. Não se pode negar que, em alguns momentos, a prefeitura do município de Manacapuru apoiou o projeto, porém não assumiu a manutenção dele. A ação do estado consistiu em enviar o secretário de produção rural para visita *in loco* ao projeto, o qual

considerou extraordinário, porém nada fez para mantê-lo ou multiplicá-lo. Vale registrar que o projeto foi veiculado na TV Senado no programa EcoSenado.

Entende-se que a postura do estado e do município seria diferente caso estivessem devidamente preparados para lidar com a problemática energética regional, nos termos em que é proposto pela metodologia desenvolvida pelo INEDES.

7. Conclusões

No trabalho foram apresentadas duas propostas. A primeira se refere ao ordenamento jurídico e o empoderamento da sociedade local no tocante à problemática energética. As barreiras normalmente levantadas quanto à praticidade dessa ação consistem na falta de recursos humanos e financeiros por boa parte das administrações públicas locais. Apesar da metodologia proposta pelo INEDES apresentar mecanismos para superação destas barreiras, entende-se que essa ação é também passível de ser implementada no âmbito dos Programas de Eficiência Energética regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica, podendo ser enquadrado na tipologia Poder Público na ação de Gestão Energética. No entanto, considera-se mais apropriado o enquadramento na modalidade de projetos especiais de grande relevância. Essa ação poderá propiciar ganhos imediatos para a distribuidora, uma vez que é significativo o número de municípios que estão inadimplentes com suas despesas com energia elétrica, sendo essa sempre crescente.

A segunda proposta apresentada no trabalho faz menção a um modelo de negócio para suprimento elétrico de comunidades isoladas na Amazônia sobre o qual vale registrar: i) o modelo proposto não está pautado na fonte energética ou tecnologia para geração de energia elétrica adotada no projeto; ii) o modelo proposto pode ser aperfeiçoando com o envolvimento de um agente privado para gerir o processo produtivo até que a comunidade decida que tem condições de assumir o processo; iii) o modelo proposto é passível de replicação, em suas bases de sustentação, com pequenas adequações à realidade a ser contemplada; iv) o envolvimento das distribuidoras é de suma importância para assegurar a qualidade técnica e a inexistência de conflitos com o arcabouço legal do setor elétrico e; v) o modelo se apresenta como uma solução viável e adequada, não só para superar problemas energéticos, mas para alicerçar o desenvolvimento socioeconômico em bases sustentáveis.

8. Agradecimentos

Registramos nossos agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e a todos os pesquisadores que contribuíram com o desenvolvimento do projeto NERAM, bem como, aos comunitários que abraçaram o projeto.

9. Referências

Association For Public Service Excellence (APSE). **Municipal Energy: Ensuring Councils Plan, Manage and deliver on local energy.** 2015.

Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). **Plataforma Enerflix.** Disponível em: <https://enerflix.com.br/>. Acesso em: 31/01/2024.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). **Observatório de Inovações para Cidades Sustentáveis.** Disponível em: <https://oics.cgee.org.br/>. Acesso em: 31/01/2024.

Collaço, Flávia Mendes de Almeida; Bermann, Célio. Perspectivas de Gestão de Energia em Âmbito Municipal no Brasil. **Estudos Avançados**, vol. 31, p. 213-235, 2017.

European Commission. **Guidebook How to develop a Sustainable Energy Action Plan (SEAP) in South Mediterranean Cities.** 2014.

Genchev, Z.; Manchev, P.; Nakova, K.; Dukov, D. **Guide for municipal decision makers and experts: Municipal Energy Planning, Common Framework Methodology.** Bulgária, 2010.

Instituto Energia e Meio Ambiente (IEMA). **Exclusão Elétrica na Amazônia Legal: Quem ainda está sem acesso á energia elétrica?** Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2021/02/relatorio-amazonia-2021-bx.pdf>. Acesso em: 31/01/2024.

Junior, W. **Implantação da Gestão Energética no Município de Aparecida-PB: Um estudo de caso.** Monografia. Especialização em Gestão Pública. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, Brasil, 2018.

Ministério de Minas e Energia. **Guia Prático para Preparação de Investimentos Urbanos – EE e FV em Prédios Públicos.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/felicity/caixa-de-ferramentas/guia-pratico>. Acesso em: 29/01/2024.

Kaselofsky, Jan; Rosa, M.; Jekabsone, A.; Favre, S.; Loustalot, G.; Toma, M.; Marín, J. P. D.; Nicolás, M. M.; Cosenza, E. Getting Municipal Energy Management Systems ISO 50001 Certified: A Study with 28 European Municipalities. **Sustainability**, vol. 13, p. 2 – 17, 2021.

Souza, R. C. R. **Planejamento do Suprimento de Eletricidade dos Sistemas Isolados na Região Amazônica: Uma abordagem multiobjetiva.** Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas-SP, 2000.

Souza, R. C. R.; Carvalho, J. M. Y.; Melo, K. B.; Silva, T. C. **Políticas Energética Regionais: Guias para internalizar o uso de fontes renováveis e eficiência energética na gestão pública.** Editora Bem Comunicar, 2021.

Gás Natural

Avanços conquistados
no Amazonas



Acompanhe os principais resultados*:



19.466 mil
unidades consumidoras
contratadas



293 km
rede de distribuição
de gás natural



5,6 milhões
de metros cúbicos/dia
de volume distribuído



R\$ 975,3
milhões de investimentos
na rede de distribuição de
gás natural

*Dados de Abril de 2024



6,2 mi tCO2e

emissões de Gases de Efeito Estufa evitadas com o uso
gás natural pelas usinas termoelétricas no Amazonas.

(Base: De 2010 a 2023)



cigás Companhia de
Gás do Amazonas

Promovendo
Soluções Energéticas
a partir do gás natural

www.cigas-am.com.br | [/ @cigasamazonas](https://www.youtube.com/@cigasamazonas) | [/ @cigasam](https://www.instagram.com/@cigasam) | [/ @CigasAmazonas](https://www.linkedin.com/@CigasAmazonas)







UFAM



CDEAM
Centro de Desenvolvimento
Energético Amazônico



FÓRUM PERMANENTE DE
Energia da UFAM

