

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

DENIS DA SILVA MIRANDA

Análise da viabilidade de geração elétrica em sistemas isolados da Amazônia: Estimativa de impactos ambientais e sociais do biogás como fonte de energia

São Paulo
2023

DENIS DA SILVA MIRANDA

Análise da viabilidade de geração elétrica em sistemas isolados da Amazônia: Estimativa de impactos ambientais e sociais do biogás como fonte de energia

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alexandre Kulay

São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Miranda, Denis da Silva

Análise da viabilidade de geração elétrica em sistemas isolados da Amazônia: Estimativa de impactos ambientais e sociais do biogás como fonte de energia / D. S. Miranda -- versão corr. -- São Paulo, 2023.

100 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Energia Renovável 2.Avaliação de Ciclo de Vida 3.Biogás 4.Sociedade 5.Meio Ambiente I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

Nome: MIRANDA, DENIS DA SILVA

Título: Análise da viabilidade de geração elétrica em sistemas isolados da Amazônia: estimativa de impactos ambientais e sociais do biogás como fonte de energia

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovada em: 09/03/2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr.: Carla Kazue Nakao Cavaliero
Instituição: UNICAMP
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Rubem Cesar Rodrigues Souza
Instituição: UFAM
Julgamento: Aprovado

Prof. Dr.: Luiz Alexandre Kulay
Instituição: EP - USP
Julgamento: Aprovado

RESUMO

MIRANDA, D. S. Análise da viabilidade de geração elétrica em sistemas isolados da Amazônia: estimativa de impactos ambientais e sociais do biogás como fonte de energia. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

Por meio da aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, este trabalho buscou quantificar prospectivamente os impactos causados pela geração de energia elétrica de fonte renovável para populações em três municípios da Amazônia brasileira isolados do Sistema Interligado Nacional (SIN) e com potencial para uso de resíduos da atividade agropecuária. A primeira etapa do trabalho buscou dimensionar uma planta de produção de biogás que considerasse a demanda elétrica local, a quantidade de resíduo da agropecuária disponíveis na região e as tecnologias implementadas no mundo para o bom funcionamento de uma planta de digestão anaeróbia. Variáveis-chave do processo foram selecionadas, em uma segunda etapa, para avaliação dos possíveis impactos ambientais causados pela operação das usinas elétricas a biogás. O intuito foi de comparar o abastecimento renovável em relação ao atual abastecimento de energia a óleo diesel e a conexão com o SIN em três categorias de impacto ambiental. Todos os cenários descritos pela geração a biogás se mostraram favoráveis do ponto de vista das emissões equivalentes de carbono e demanda primária de energia em comparação com a geração elétrica a partir de óleo diesel, porém na categoria de ecotoxicidade em água, melhorias nos processos precisam ser implementadas para que os cenários alternativos se tornem mais interessantes. A última etapa do trabalho foi a medida de uma dimensão social que justificasse o abastecimento elétrico a partir de biogás ou diesel. Assim, a atenção foi voltada para a qualidade de vida dos trabalhadores responsáveis pela operação das usinas elétricas. Um indicador análogo ao Índice de Desenvolvimento Humano foi escolhido para esse fim e mostrou que, mesmo envolvendo mais trabalhadores rurais e de baixa qualificação que a operação de usinas a diesel, a usina a biogás não apresentou perdas significativas na qualidade de vida dos trabalhadores e ainda apontou um potencial de maior inclusão da população local nas cadeias de valor.

Palavras-chave: Biogás. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Energia renovável. Amazônia. Avaliação socioambiental.

ABSTRACT

MIRANDA, D. S. Feasibility of electric generation in isolated systems in Amazon: Estimation of environmental and social impacts of biogas as energy source. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

Through the application of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, this work aims to prospectively quantify the impacts caused by a renewable power for three municipalities in the Brazilian Amazon isolated from the National Interconnected System (SIN), which have a potential of use of residues from agricultural activities. The first step of the work sought to dimension a biogas production plant that considered the local electrical demand, the amount of agricultural waste available in the region and the technologies implemented worldwide for the proper functioning of an anaerobic digestion plant. Key process variables were selected, in a second step, to assess the possible environmental impacts caused by the biogas power plants operation. The objective was to compare the renewable energy supply in relation to the current fossil energy supply and the SIN connection in three categories of environmental impact. All biogas generation scenarios were favorable from the point of view of carbon equivalent emissions and primary energy demand compared to electrical generation from diesel oil, but in the water ecotoxicity category, improvements in processes need to be implemented to make the alternative scenarios more interesting. The last stage of the work was the measurement of a social dimension that would justify the electricity supply from biogas or diesel. Thus, attention was focused on the quality of life of the workers responsible for operating the power plants. An indicator analogous to the Human Development Index was chosen for this purpose and showed that, even involving more rural and low-skilled workers than the operation of diesel power plants, the biogas power plant did not present significant losses in the workers quality of life and even pointed out a potential for greater inclusion of the local population in value chains.

Keywords: Biogas. Life Cycle Assessment (LCA). Renewable energy. Amazon. Socio-environmental assessment.

SUMÁRIO

1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	8
2. OBJETIVOS	10
3. SUMÁRIO EXECUTIVO	11
4. ESTUDO PROSPECTIVO DA VIABILIDADE AMBIENTAL DO SUPRIMENTO ENERGÉTICO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA POR MEIO DA GERAÇÃO ELÉTRICA A BIOGÁS	13
4.1. INTRODUÇÃO	14
4.2. MÉTODOS	16
4.2.1. Construção de modelo de usina de geração elétrica a biogás.....	16
4.2.2. Escolha de parâmetros de operação.....	18
4.2.3. Definição de cenários	20
4.2.4. Modelagem em ACV	28
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.3.3. Potencial de aquecimento global (GWP)	34
4.3.4. Demanda primária de energia (PED)	39
4.3.5. Ecotoxicidade em água fresca (FWET).....	40
4.3.6. Indicador ambiental único	41
4.4. CONCLUSÃO	45
5. VIABILIDADE SOCIAL DA GERAÇÃO ELÉTRICA A BIOGÁS EM COMUNIDADES AMAZÔNICAS ATRAVÉS DA DETERMINAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO HUMANO DOS TRABALHADORES	47
5.1. INTRODUÇÃO	48
5.2. BACKGROUNDS	50
5.2.1. ACV-S.....	50
5.2.2. IDH-T	51
5.3. MÉTODO.....	53
5.3.1. Definição de cenários de análise	54

5.3.3.	Obtenção de dados e cálculo do IDH-T	58
5.4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.4.1.	Número de trabalhadores estimado	60
5.4.2.	Cálculo do IDH-T.....	63
5.5.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	71
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICES	85

1. CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Além de abrigar a maior biodiversidade do planeta, a Amazônia é também o lar de cerca de 30 milhões de brasileiros, uma população submetida, em grande parte, à falta de diversos serviços essenciais, entre eles o fornecimento de eletricidade. Essa situação configura aliás, um paradoxo curioso e lamentável, uma vez que a região detém expressivo potencial de geração de energia desde variadas fontes naturais.

No contexto em questão, o acesso à eletricidade representa mais além do que dispor de iluminação para moradias, comércios ou vias de deslocamento, de tornar viável meios de comunicação com outras regiões do planeta, ou mesmo, prover meios adequados para a conservação de alimentos naturalmente expostos às condições locais, que são extremas em termos de temperatura e grau de umidade. Para muitas comunidades dispor de uma oferta regular de eletricidade significa ser capaz de atender a necessidades (ou direitos) legítimas e fundamentais como educação e saúde.

A despeito de sua inegável importância para o cenário mundial contemporâneo, a Amazônia segue sendo constantemente exposta a muitos riscos em virtude de desmedidas ações antrópicas, como o avanço do agronegócio, e o extrativismo, vegetal e mineral, que ocorrem na região sem a observância de cuidados no manejo, o estabelecimento de planos de gestão, ou mesmo, e antes, de arcabouços legais eficientes e protetivos. O quadro inspira cuidados e torna urgente a proposição de alternativas que resultem na melhoria da qualidade de vida daquela população. No entanto, avanços nesse campo precisam ocorrer tendo em conta o uso consciente de recursos do bioma. Esse desafio busca implementar modelos de desenvolvimento econômico dissociados da devastação de áreas de floresta, do remanejamento de populações tradicionais, e de alterações na paisagem e nos ciclos biológicos, o que é comum na grande maioria dos projetos de desenvolvimento para a região que vêm sendo propostos nas últimas cinco décadas. Além disso, é prioritária a inclusão das populações locais em qualquer projeto pensado para região, não apenas como personagens passivos, consumidores ou população impactada, mas sim como agentes de transformação social, participantes diretos das cadeias de valor no contexto amazônico.

Sendo assim, modelos de empreendimentos na Amazônia que envolvem o mínimo de amazônidas, dependem de insumos externos que chegam através de uma intrincada logística e oferecem alto risco ao meio ambiente deveriam ser evitados a todo custo, porém esse é exatamente a realidade de mais de uma centena de localidades na Amazônia brasileira que

dependem exclusivamente de óleo diesel para atender as suas necessidades energéticas, os Sistemas Isolados, que configuram uma incongruência do ponto de vista ambiental e social e, até mesmo, econômico.

Dentre as estratégias capazes de atender a tantos requisitos destacam-se os modelos descentralizados de aproveitamento energético, que muito embora localizados em áreas antropizadas, poderiam se difundir de forma capilarizada para comunidades menores. É esse o caso da geração de eletricidade a partir de biogás oriundo da digestão anaeróbia de rejeitos pecuários (p.e. esterco) e agrícolas (biomassa renovável).

A disponibilidade desses insumos, em características e volume, permite conceber instalações modulares capazes de atender as demandas de municípios ou localidades de escalas diversas. Por outro lado, e como já fora mencionado antes, esse desenvolvimento deve trazer impactos menos significativos para o entorno do que os meios convencionais de geração de energia. É exatamente esse aspecto que a presente pesquisa acadêmica se propõe a investigar.

2. OBJETIVOS

Este trabalho de pesquisa se propõe a contribuir para a universalização do acesso à energia limpa, verificando as viabilidades técnica, ambiental e social de arranjos de projeto que atendam às demandas energéticas de comunidades na Amazônia, contribuindo, assim, para a aproximação da região ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS 7). A adoção desse enfoque cria meios para que objetivos mais amplos sejam alcançados: (i) Apontar os potenciais impactos ambientais da geração de energia a biogás para municípios em sistemas isolados; (ii) Entender como a operação de usina a biogás afeta a qualidade de vida dos trabalhadores envolvidos na cadeia; (iii) Quantificar os impactos socioambientais da geração de energia elétrica vigentes em alguns municípios da Amazônia, a partir de óleo diesel. Com isso, o estudo se propõe a trazer subsídios para que gestores e legisladores públicos passem a considerar esta possibilidade de provimento de eletricidade limpa para as comunidades em tela, bem como, a incorporar mais uma questão às discussões e reflexões empreendidas pela sociedade brasileira moderna em suas mais variadas esferas.

3. SUMÁRIO EXECUTIVO

A presente dissertação foi elaborada no formato de manuscrito para submissão a um periódico científico, uma configuração prevista para o arazoado na subseção VII.2.2 da versão vigente do Regulamento do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (PEQ-EPUSP). A fim de apresentar ao leitor outros elementos associados ao trabalho, como definir seus contexto, localizar os avanços realizados e interpretar seus resultados de maneira organizada o documento foi complementado por outros capítulos.

Tal como adianta o próprio título, o Capítulo 1 – Contexto e Justificativa, descreve de maneira sintética o cenário em que a pesquisa se insere, assim como, traz argumentos que justificam sua realização. Assim, são objetos dessa narrativa, a problemática vivida por populações da Amazônia localizadas em áreas desconectadas do Sistema Interligado Nacional (SIN), cuja energia elétrica é, por isso, suprida basicamente por fontes fósseis. O capítulo apresenta ainda a proposta do projeto de pesquisa: de atender àquelas demandas de forma ambientalmente sustentável, via geração de energia por queima de biogás. Esse conteúdo é desenvolvido de maneira a convergir para os objetivos do estudo, expressados formalmente no Capítulo 2 do documento.

Também como o título enseja, este Capítulo 3 busca orientar o leitor quanto aos elementos que compõem a Dissertação, situando-o quanto aos avanços e conclusões alcançados pela pesquisa.

O Capítulo 4 e Capítulo 5 têm em seu conteúdo os artigos científicos gerados a partir do trabalho de pesquisa, intitulados respectivamente: *“Estudo prospectivo da viabilidade ambiental do suprimento energético da Amazônia brasileira por meio da geração elétrica a biogás”* e *“Viabilidade social da geração elétrica a biogás em comunidades amazônicas através da determinação do desenvolvimento humano dos trabalhadores”*.

No Capítulo 4 estão descritas as etapas realizadas para estimativa dos impactos ambientais acarretados por uma unidade de geração elétrica movida por esterco bovino e biomassa agrícola. Merecem especial destaque nesta seção, o modelo matemático elaborado para especificar aspectos tecnológicos, e condições de operação da usina, e as abordagens que foram realizadas para efetuar uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) dos diferentes cenários estabelecidos a partir de sua operação para variadas circunstâncias.

Já no Capítulo 5, a metodologia de ACV (com um viés social) inspirou o uso de um indicador que expressasse o desenvolvimento das comunidades onde a geração de energia através da produção de biogás fosse incentivada. O que levou a medida do chamado Índice de Desenvolvimento Humano dos Trabalhadores (IDH-T) voltado para mensurar a qualidade de vida das pessoas envolvidas na operação de plantas elétricas a biogás em comparação com outras fontes de energia.

O documento termina com as considerações finais (Capítulo 6), que apresenta as dificuldades e limitações do estudo, bem como as perspectivas para o futuro do tema.

4. ESTUDO PROSPECTIVO DA VIABILIDADE AMBIENTAL DO SUPRIMENTO ENERGÉTICO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA POR MEIO DA GERAÇÃO ELÉTRICA A BIOGÁS

Denis da Silva Miranda, Luiz Kulay

Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica – Universidade de São Paulo São Paulo, Brasil

Resumo

Com o intuito de estimular a geração elétrica através de fontes renováveis em uma região de grande apelo socioambiental e com grandes distorções econômicas, este trabalho procura medir os impactos ambientais de uma usina elétrica movida a biogás, que utiliza resíduos da atividade agropecuária como substrato a fim de atender uma das mais de 160 localidades que não são atendidas pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável por levar energia a todo o resto do país. Quase a totalidade dessas localidades são abastecidas por usinas elétricas movidas a diesel, e se encontram na região com os menores índices sociais do Brasil e com sérios entraves ao desenvolvimento, a Amazônia. O estudo partiu da construção de um modelo de usina baseada em usinas movidas a biogás em operação ao redor do mundo descritas na literatura e adaptadas às condições e peculiaridades da região de interesse, bem como em consultas ao arcabouço científico acerca da digestão anaeróbia. Os dados obtidos com o modelo de usina elétrica para a Amazônia foram, então, avaliados do ponto de vista ambiental e técnico com a aplicação do método de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e se mostraram favoráveis do ponto de vista das emissões equivalentes de carbono e demanda primária de energia para todos os cenários analisados em comparação com a geração elétrica a partir de óleo diesel, porém nas categorias de ecotoxicidade, melhorias nos processos precisam ser implementadas para que os cenários alternativos se tornem mais interessantes. O estudo mostrou que atenção especial deve ser dada à destinação do digestato, a emissões de metano e à logística de obtenção dos substratos, uma vez que dessas etapas advêm os maiores impactos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Biogás, Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), geração de eletricidade, Amazônia brasileira

4.1. INTRODUÇÃO

No mundo, cerca de 790 milhões de pessoas não têm acesso à energia (10% da população mundial), desse total, cerca de metade vive na África subsaariana e os demais, espalhados principalmente nas zonas rurais dos países em desenvolvimento na Ásia e Américas (ONU, 2022). A falta de acesso à energia é, ao mesmo tempo, causa e consequência da perda de qualidade de vida de populações que vivem em regiões já consideradas precárias. Além disso, ainda é predominante o uso de fontes poluentes como recurso de produção de energia elétrica no mundo, mesmo diante de uma crise climática sem precedentes. Sendo assim, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu a “Energia acessível e limpa” como um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) a serem alcançados pela humanidade até 2030.

No Brasil, embora 84% da produção de energia seja gerada a partir de fontes renováveis (EPE, 2021) e exista um sistema de geração e distribuição de energia elétrica bastante robusto que leva essa energia à maior parte do território nacional, o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN), esse sistema ainda não consegue abastecer as regiões pouco adensadas e com grande dificuldades logísticas, como é o caso da Amazônia. Nessa região, grande esforço técnico, logístico e econômico é empregado pelos órgãos competentes para que a população local não fique desassistida energeticamente e, nesses casos, com a ausência do SIN, os chamados Sistemas Isolados (SISOL) são operados, nos quais a energia é gerada localmente e abastece apenas o município onde opera e os distritos próximos. Assim, é requerida mais atenção ao abastecimento elétrico da região amazônica, tanto para a melhoria dos sistemas isolados quanto para a inclusão de quase 1 milhão de brasileiros que ainda vivem sem eletricidade nessa região (IEMA, 2018),

Em 2022, serão operados sistemas isolados em 165 localidades, que atendem uma população de aproximadamente 3 milhões de pessoas e têm previsão de carga de 442 MW_{méd} até o final do ano, ou seja, 0,6% da carga total nacional (ONS, 2021). Nessas localidades o fornecimento de energia é majoritariamente oriundo de termelétricas a óleo diesel, sendo esta fonte responsável por 95% da potência instalada para sistemas isolados.

Também é fonte energética das usinas de sistemas isolados o gás natural, outro combustível fóssil, que responde por 4,3% da potência instalada, e apenas 1,1% da potência dos sistemas isolados advém de fontes renováveis, como a hidráulica e biomassa (0,7% e 0,4%, respectivamente), segundo o Plano Anual da Operação Energética dos Sistemas Isolados para 2021 (ONS, 2021).

A participação quase total dos combustíveis fósseis na matriz energética dos sistemas isolados, faz com que o abastecimento elétrico de populações amazônicas seja, não apenas bastante poluente, mas também muito dependente da importação do diesel, que chega a partir dos rios e das estradas bastante precárias da região e torna o abastecimento bastante oneroso. Além disso, é importante ressaltar que, embora o potencial hidroelétrico da região amazônica seja enorme, a construção de barragens nas planícies amazônicas causam danos irreversíveis ao ambiente e populações locais, o que apenas reforça o conceito de “injustiça energética” (GURUSWAMY, 2010; Ribas e Simões, 2020), uma vez que as regiões com mais alta atividade econômica, distantes da Amazônia, recebem as benesses do abastecimento energético pleno e as populações locais acumulam danos sociais e ambientais. Portanto, a geração local de energia elétrica a partir de fontes renováveis e que causem o menor impacto possível no bioma amazônico e nas sociedades locais é de importância estratégica ao desenvolvimento regional.

Como as atividades econômicas da maioria dos municípios amazônicos abastecidos por meio de sistemas isolados estão ligadas ao agronegócio, e essas atividades geram resíduos com alta carga orgânica sem destinação definida, o aproveitamento desses resíduos, (esterco e palha, por exemplo) como substrato para a produção de biogás e geração de energia elétrica a essas comunidades se mostra uma interessante alternativa às usinas movidas a diesel em operação.

Biogás é o nome dado ao gás resultante do processo de “digestão anaeróbia”: um processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio. Nessas condições matéria orgânica complexa, como carboidratos, lipídeos e proteínas é degradada em moléculas cada vez menores por consórcios de microrganismos até a conversão destas em metano e gás carbônico (entre outros gases em pequenas quantidades) (KIRAN et al, 2016; KIRK e GOULD, 2020).

O biogás é considerado uma valiosa fonte de energia, seu poder calorífico varia de acordo com seu percentual de metano e se encontra em uma faixa entre 21 e 23 MJ/kg (INDRAWAN et al, 2018), que pode ser aproveitada em grupos geradores para a conversão em energia elétrica e térmica. É importante ressaltar que a produção de biogás também produz expressiva quantidade de efluente, denominada como digestato, cuja composição depende das características da alimentação do digestor, mas, no geral, é rico em matéria orgânica e nutrientes como nitrogênio e fósforo, bem como íons metálicos diversos. Por isso, seu aproveitamento como preparador de solo é bastante empregado.

A produção de biogás tem sido bastante incentivada tanto em países desenvolvidos, quanto em países em desenvolvimento (MWIRIGI et al, 2014; RUPF et al, 2015), uma vez que se mostra uma tecnologia capaz de gerar energia à medida que trata resíduos e aumenta a

fertilidade de solos quando manejada de maneira adequada (RUPF et al, 2015). Plantas de biogás de pequena escala são encontradas em grande quantidade na Índia, Tanzânia, Ruanda, África do Sul e China (JIANBO e XIANYI, 2021, RUPF et al, 2015), também são encontrados exemplos de plantas de média e grande escala em países da Europa como Alemanha, Dinamarca e Grécia, e em países asiáticos como China, Turquia e Índia. Para o desenvolvimento desse trabalho, plantas de geração elétrica a biogás de média e grande escala localizadas nas regiões supracitadas foram usadas como referência para o dimensionamento de plantas semelhantes voltadas ao abastecimento de uma região no interior da Amazônia considerando as características locais, com a finalidade de medir os impactos ambientais desta forma de produção de energia através da aplicação de uma análise de ciclo de vida (ACV) a diferentes cenários produtivos.

4.2. MÉTODOS

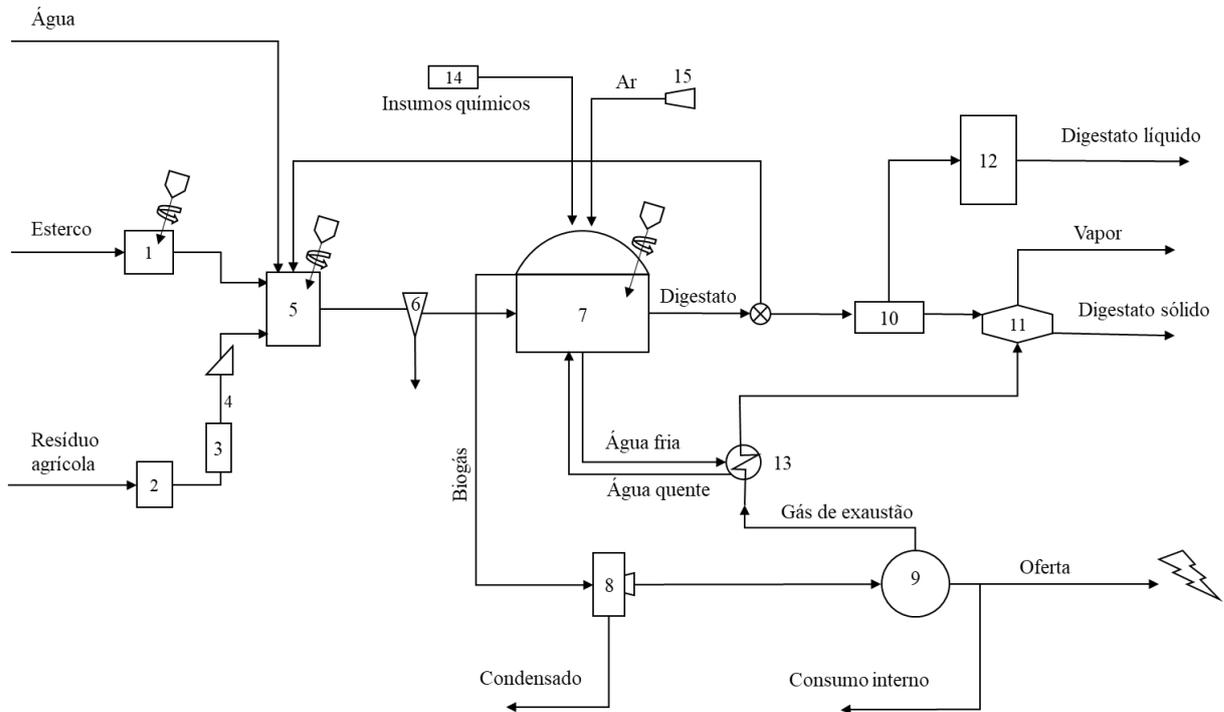
Para a realização deste trabalho, foram seguidas as etapas de (i) construção de modelo de usina de geração elétrica a biogás, (ii) escolha de parâmetros de operação com revisão e validação de modelo na literatura, (iii) Definição de cenários com base na determinação de variáveis de interesse, (iv) modelagem em ACV para obtenção de resultados referentes ao desempenho ambiental de cada cenário, e (v) avaliação dos indicadores ambientais.

4.2.1. Construção de modelo de usina de geração elétrica a biogás

Primeiramente, um modelo de usina elétrica movida a biogás foi construído considerando-se todos os principais processos técnicos envolvidos na produção e utilização do biocombustível, tais como: o recebimento e armazenamento de substrato, o transporte por bombas (em caso de líquidos), a moagem e transporte em correias (em caso de sólidos), a agitação mecânica com uso de motores elétricos em todos os tanques, a remoção de materiais inorgânicos do substrato por meio de hidrociclone, a modelagem de um reator do tipo CSTR com o emprego de cinéticas de digestão anaeróbia para obtenção de biogás, a oxidação bioquímica de compostos de enxofre no processo (através da injeção de 0,4% m/m de O₂ no digestor), a remoção de umidade do biogás por compressão, a separação do digestato em uma fração sólida e outra líquida, através de uma prensa de rosca, e suas respectivas destinações, a geração elétrica e térmica em sistema de moto-gerador, além das perdas nos processos

correspondentes a emissões envolvidas para a realização de balanços de massa e energia e avaliação ambiental mais fidedignos. Um esquema do modelo é apresentado na Figura 4.1 e o dimensionamento dos equipamentos está descrito no Apêndice A.

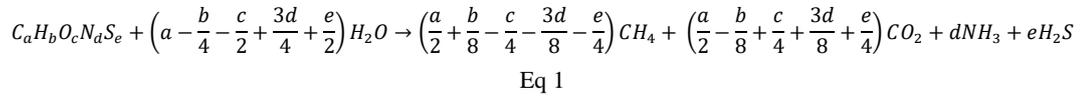
Figura 4. 1 - Esquema de modelo de usina a biogás



Legenda: (1): tanque de armazenamento de esterco; (2): pátio de descarga de palha; (3): moinho; (4): rosca transportadora; (5): misturador; (6): desarenador; (7): digestor anaeróbio; (8) desumidificador de biogás; (9) unidade combinada de calor e energia; (10) separador sólido-líquido; (11) tambor de secagem rotativo; (12) tanque de digesto líquido; (13) trocador de calor; (14) armazenamento de produtos químicos; (15) sistema de injeção de ar.

O balanço de massa do processo de operação da usina a biogás foi realizado a partir da conservação de massa total das correntes de entrada e saída, bem como da massa de carbono e nitrogênio presente nas correntes. Para a estimativa de composição do biogás gerado na etapa de digestão foi aplicado o balanceamento estequiométrico da equação geral que rege a degradação anaeróbia da biomassa (Equação 1) (ACHINAS e EUVERINK, 2016; BUSWELL e HATFIELD, 1936), cuja composição química variou de acordo com o tipo e proporção entre os co-substratos utilizados. Um exemplo do cálculo para a determinação da composição do biogás está descrito no Apêndice B. O balanço de energia levou em consideração os consumos energéticos de cada equipamento escolhido para o processamento de biomassa e produção de

biogás. O valor total do consumo de energia para o funcionamento dos equipamentos da planta foi abatido da produção de energia gerado e o restante foi ofertado à comunidade.



4.2.2. Escolha de parâmetros de operação

O modelo foi inspirado e validado por plantas industriais descritas na literatura, estudos acerca da digestão anaeróbia e em processos de engenharia. A Tabela 4.1 mostra as plantas descritas na literatura com bom grau de detalhamento que serviram de base para a construção de um modelo que se aproximasse de plantas em operação pelo mundo. Todas as usinas descritas na Tabela 4.1 utilizam reatores do tipo CSTR, são alimentadas majoritariamente por esterco bovino como substrato e operam a digestão anaeróbia em temperaturas dentro da faixa mesofílica (entre 36°C e 45°C).

Alguns parâmetros de operação empregados no modelo foram fixados a partir de boas práticas descritas na literatura tanto de ensaios experimentais acerca da digestão anaeróbia (XIAOJIAO, 2012; MUHAYODIN et al, 2021, PIEKUTIN et al, 2021; SCHNÜRER et al, 2017; ZEHUI et al, 2020; HONG et al, 2021), quanto para a operação de plantas de biogás (Tabela 4.1).

Tabela 4. 1 - Usina a biogás tomadas como referência para o estudo.

Referência	Local	Potência (kW)	Volume útil do digestor (m³)	Nível de agitação (W/m³)	Alimentação (t/dia)	Teor de sólidos (%)	Matéria orgânica seca (%)	TDH	Temperatura de operação (°C)	Vazão de biogás (Nm³/dia)	Potência por volume de reator (kW/m³)	Geração por volume de biogás (kWh/Nm³)
IEA Bioenergy, 2014	Dinamarca	5605	37500	N.E.	1986	N.E.	N.E.	24,0	40,0	49315	0,149	2,73
Envitec Biogas, 2008	India	1063	11394	N.E.	247	15	N.E.	N.E.	38	12500	0,093	2,04
Hongyan et al., 2013	China	1020	3200	N.E.	125	15	N.E.	N.E.	N.E.	10959	0,319	2,23
Önen et al., 2019	Alemanha	800	5318	13,92	53	9,6	75	90	43	N.E.	0,150	N.E.
Akbulut et al., 2021	Turquia	625	5110,5	13,11	133	9,5	88	40	43	3348	0,122	4,48
Spyridonidis et al, 2020	Grecia	550	4200	N.E.	139	10	83	30	39	4147	0,131	3,18
Akbulut et al., 2012	Turquia	500	2713	N.E.	80	9,5	85	33,0	40,0	2309	0,184	N.E.
Xiaolin et al., 2010	China	160	1200	6,25	60	10	N.E.	20	38	N.E.	0,133	N.E.
Panuccio et al, 2016	Itália	998	7500	N.E.	120	40	52,5	60,0	40,0	440	0,133	N.E.

Tabela 4. 2 - Parâmetros de operação para o modelo de usina a biogás dimensionado.

Sólidos totais	13%
Taxa de reciclo	1.0
Rendimento global	80%
C/N	25

A seleção de tais parâmetros advém da melhor combinação de valores cujos resultados calculados para parâmetros como taxa de alimentação de orgânicos (OLR) e tempo de detenção hidráulica (HRT), recaíssem em uma faixa comparável com àqueles das plantas descritas na Tabela 4.1. Foram também consultados especialistas em produção de biogás quanto a que escolhas seriam mais adequadas aos objetivos do estudo. Os principais parâmetros de operação fixados para todos os cenários constam da Tabela 4.2.

4.2.3 Definição de cenários

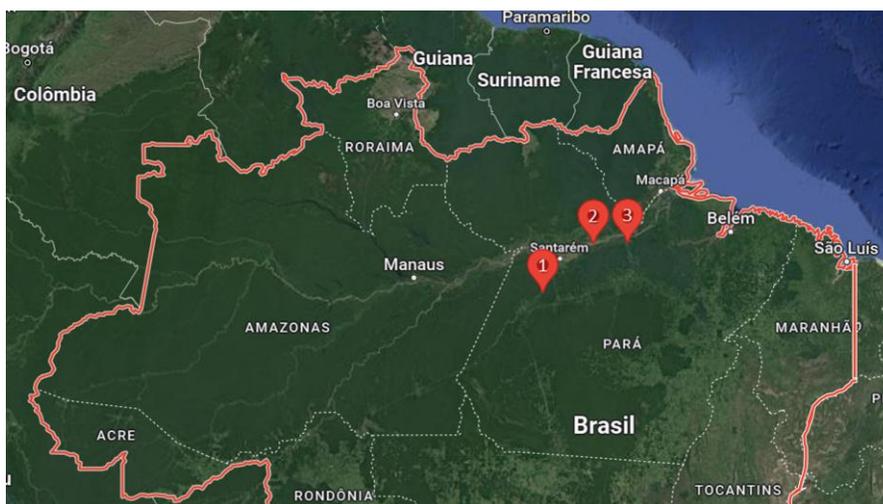
A construção dos cenários avaliados pela metodologia de ACV, observou variações dos seguintes critério ou atributos: (i) localização da usina; (ii) tipo de co-substrato; (iii) cinética de produção de biogás; e (iv) destinação do digestato.

Variar a localização da planta traz informações sobre a dimensão da demanda a ser atendida pela usina, oferta de substrato na região, e aspectos logísticos como distâncias a serem percorridas e modais utilizados,, no estudo foram avaliadas três localizações na Amazônia. Cada substrato possui teores próprios de carbono, nitrogênio e umidade, que podem influenciar a operação das plantas. Por isso, tais parâmetros são considerados prioritários para efeito de elaboração do modelo e buscou-se medir os efeitos da utilização de dois co-substratos para o processo. A cinética de produção de biogás permite estimar parâmetros como tempo de detenção hidráulica, eficiência de conversão, e taxas de alimentação de insumos para a usina. A escolha de duas cinéticas de produção de biogás busca avaliar uma faixa de resultados possíveis, uma vez que esse é um parâmetro muito específico para cada conjunto de condições operacionais. Por fim, uma simulação de três formas de destinações final do digestato – que oscilam entre seu lançamento *in natura* no ambiente, até o reaproveitamento como fonte de macronutrientes primários para o solo, abre a perspectiva para que sejam verificados os efeitos dessas práticas sobre o desempenho ambiental global do processo. Os cenários de estudo, estabelecidos a partir de variações do critérios (e atributos) apresentados anteriormente, estão descritos na Tabela 4.8 e melhores descritos nas sessões a seguir.

4.2.3.1 Localidades

O estudo de ACV foi realizado para o abastecimento elétrico, por meio de uma usina a biogás dimensionada para três dos 16 municípios atendidos por sistemas isolados que operam no Estado do Pará: Aveiro, Prainha e Porto de Moz. A seleção dos municípios seguiu o critério de produção agropecuária local, capaz de abastecer com substrato uma usina a biogás e gerar energia suficiente para o atendimento à respectiva demanda energética da população. Para isso cruzou-se os dados do relatório de Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados (EPE, 2021), da Pesquisa Pecuária Municipal (IBGE, 2020a), da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2020b) e do último Censo Agro (IBGE, 2017). A seleção das localidades também levou em consideração uma classificação das demandas dos municípios em três faixas de magnitude: menor que 1 MW, entre 1 e 2 MW e maior que 2 MW, a fim de avaliar os efeitos de escala para o dimensionamento das usinas a biogás. A Figura 4.2 indica a localização dos três municípios considerados pelo estudo na Amazônia brasileira.

Figura 4. 2 - Localização das localidades do estudo na Amazônia legal brasileira. 1 - Aveiro; 2 - Prainha; 3 - Porto de Moz. (Adaptado de Google Maps)



Aveiro, Prainha e Porto de Moz são três dos municípios do Pará que recebem energia através de moto-geradores movidos a diesel instalados no local. São municípios bastante carentes como retratam os números do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no último censo demográfico (2010) que classificam os municípios na faixa de nível baixo para desenvolvimento

humano, ocupando as posições 5306º, 5444º e 5524º no ranking de IDH entre os 5570 municípios brasileiros. Na Tabela 4.3 são destacados, além de dados demográficos acerca das localidades selecionadas para o estudo, também informações relevantes para o dimensionamento de uma usina a biogás nestas localidades como a demanda energética e a produção agropecuária.

Tabela 4. 3 - Indicadores sociais e agrários das localidades do estudo.

	Aveiro	Prainha	Porto de Moz
População (hab.) ^a	16421	29827	42456
IDH ^b	0,541	0,523	0,503
Área total (km ²)	17.074	14.787	17.423
Demanda elétrica (MW _{méd}) ^a	398	1338	2697
Área dedicada a pasto (%) ^{c, d}	23%	51%	42%
Área dedicada a lavoura (%) ^{c, d}	2,1%	3,6%	0,2%
População de bovinos (cabeças) ^c	30982	42792	50893
Produção de milho (t/ano) ^c	520	2850	224
Produção de arroz (t/ano) ^c	144	994	312

a Projeção para o ano de 2021 (EPE, 2020)

b Ano de referência 2010 (IBGE, 2021)

c Ano de referência 2020 (IBGE, 2021)

d Em relação a terras economicamente ativas (IBGE, 2017)

4.2.3.2 Substrato

A escolha dos substratos foi feita com base nas atividades econômicas locais, tecnologias implementadas no mundo e disponibilidade de dados na literatura. Assim, como a população de bovinos nesses municípios chega a ser maior que a população de moradores (Tabela 4.3), foi feita a escolha de esterco de gado como substrato comum a todos os cenários desenhados. Um detalhe importante é que o regime de criação de bovinos deve ser de tal modo que permita a fácil acumulação de seus detritos.

Complementarmente, optou-se pela co-digestão de dois substratos no projeto de usina a biogás, decisão fundamentada na maior disponibilidade de nutrientes para os microrganismos anaeróbios, condição favorável a atividade microbiana, (HAGOS et al, 2017; JIADONG et al, 2019), e na possibilidade de correção de características físico-químicas da mistura de substrato a partir da variação das frações das diferentes biomassas utilizadas em sua composição. Sendo assim,

também foi avaliado, como co-substrato, o emprego de biomassa lignocelulósica da produção de milho ou arroz produzida dentro e próximo dos municípios estudados.

As duas culturas representam as mais expressivas produzidas na região em relação à produção de grãos. A quantidade de palha gerada da produção agrícola foi estimada com base no fator [palha/grão] que representa razão entre a massa de palha produzida para cada unidade mássica de grão. Para o contexto em análise foram aplicadas razões de [1:1,10] para o milho (ADEOYE et al, 2011) e de [1:1,65] no caso do arroz (JOSHI et al, 1995; LINQUIST e SEGXUA, 2001).

Tanto as características físico-químicas do esterco bovino, como da biomassa de fonte lignocelulósica foram obtidas a partir de médias de valores encontrados na literatura para os seguintes parâmetros: Sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), carbono total (TC) e nitrogênio total (TN), e são mostrados na Tabela 4.4 e 4.5. As propriedades das fontes alimentadas a usina a biogás foram determinadas via média ponderada pela proporção mássica entre diferentes co-substratos.

Tabela 4. 4 - Características do substrato 1: Esterco bovino. N.E.=Não especificado.

Referência	ST (%)	SV (%)	SV/ST	TN (% ST)	TC (% ST)	C/N
Kafle e Chen, 2016	16,9	10,2	0,61	N.E.	N.E	25,0
Feng et al, 2017	9,21	7,54	0,82	0,92	N.E	N.E
Karki et al, 2022	15,3	12,7	0,83	1,32	40,4	30,6
Yang et al, 2021	26,6	19,4	0,73	2,15	38,3	17,8
Buragohain et al, 2021	36,7	25,3	0,69	1,66	35,3	21,3
Abid et al, 2021	21,7	18,8	N.E.	5,02	43,4	8,64
Jiaying et al, 2022	22,3	19,5	0,87	2,97	45,4	15,3
Masih-Das e Tao, 2018	12,3	10,4	0,85	N.E.	N.E	N.E
Şenol et al, 2020	18,8	15,6	0,83	1,65	32,1	19,4
Jing et al, 2022	13,8	9,49	0,69	2,09	23,8	11,4
Adghim et al, 2021	21,4	12,2	0,57	0,54	N.E.	N.E.
Média	20,1	15,5	0,77	2,34	40,6	18,7

Tabela 4. 5 - Características do substrato 2: Biomassa lignocelulósica. N.E.=Não especificado.

Referência	Tipo de Biomassa	ST (%)	SV (%)	SV/ST	Cinzas (% ST)	TN (%)	TC (%)	Razão C/N
Buragohain et al, 2021		87,9	65,5	0,75	13,2	0,55	38,5	70,0
Xiaohu, 2019	Palha de arroz	89,0	81,7	0,92	N.E.	1,39	32,6	23,4
Xiaohua, 2014		90,3	85,7	N.E.	N.E.	0,60	41,7	69,5
	Média	89,1	77,6	0,83	13,2	0,85	37,6	54,3
Paranhos et al, 2020		87,0	85,3	0,98	2,41	0,62	44,0	70,7
Şenol et al, 2020	Palha de Milho	32,1	29,7	0,93	7,45	1,39	44,9	44,9
Yang et al, 2021		86,0	80,9	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	88,4
	Média	68,4	65,3	0,95	4,93	1,01	44,4	68,0

4.2.3.3 Cinética de produção de biogás

As cinéticas M e R remetem a equações cinéticas propostas respectivamente por Mushtaq et al e Ranjbar et al, ambas em 2022, para produção de biogás a partir substratos compostos por esterco bovino. Esses processos fizeram uso de substratos e de condições de operação ($T = 37 \pm 1,0$ °C) semelhantes àquelas adotadas pela planta sob modelagem, o que corroborou para sua escolha como parâmetro do estudo.

Além disso, a aplicação de uma convenção tecnológica conhecida como t_{80} (t_{80} : tempo necessário para produção de 80% do potencial máximo de biometano do substrato), usada em processos de digestão anaeróbia para determinação de tempos de detenção hidráulica (TDH) (CHENG e ZHONG, 2014; CÓRDOBA et al, 2018; ZHANG e LI, 2019), fez com que fossem obtidos valores de TDH próximos daqueles estimados para as plantas que serviram de referência para o desenvolvimento do estudo (Tabela 4.2).

Os modelos cinéticos, M e R, se ajustam à versão modificada daquele proposto por Gompertz (Equação 2) (ZWIETERING et al, 1990), de uso frequente em estudos voltados para digestão anaeróbia. Os parâmetros cinéticos de Gompertz modificado para as cinéticas de M e R são descritas na Tabela 4.6 e na Figura 4.3.

$$G(t) = G_m \times \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_m \times e}{G_m} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo:

G: produção acumulada de biogás

G_m : potencial máximo de produção de biogás

R_m : taxa de produção de biogás por unidade de tempo

λ : tempo de duração da fase *lag* no qual a produção de biogás é quase nula

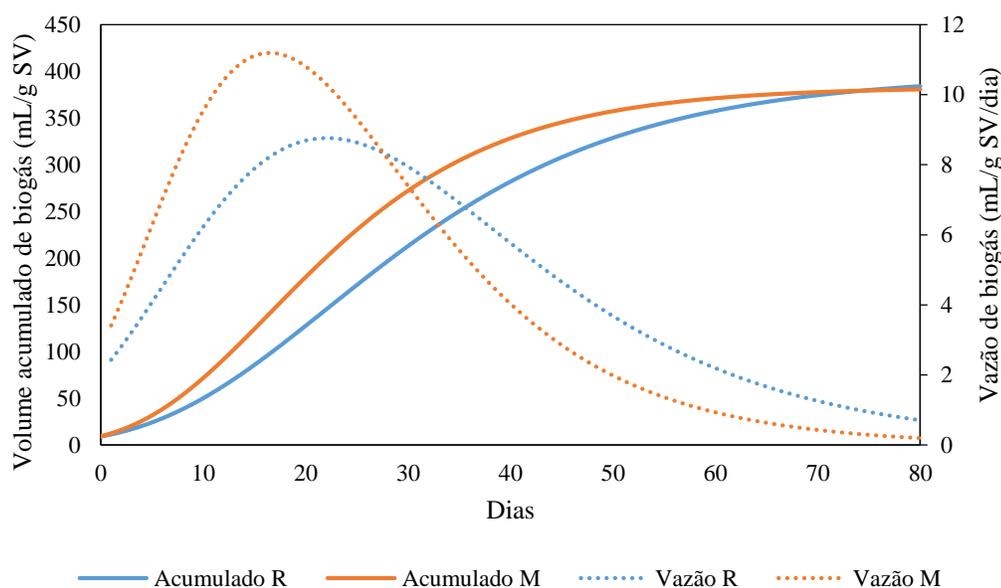
t: tempo de operação do processo

e: número de Euler

Tabela 4. 6 - Parâmetros das cinéticas de produção de biogás M e R.

Cinética	Referência	G_m (L/kgSV)	R_m (L/kgVS/dia)	λ (dia)
M	Mushtaq et al, 2022	383	11,2	3,90
R	Ranjbar et al, 2022	396	8,77	5,44

Figura 4. 3 - Volume de biogás acumulado e taxa de produção de biogás para as cinéticas M e R.



Destaca-se na Figura 4.3 a maior taxa de produção de biogás nos primeiros 28 dias do processo para a cinética M e sua rápida queda a partir deste ponto. Já a cinética R começa mais lenta, porém decai de maneira mais branda no decorrer do processo. Essa diferença é importante tanto para o consumo de substratos, quanto para a geração de energia pelo processo de digestão anaeróbia.

4.2.3.4 Destino do digestato

O resultado da digestão anaeróbia gera, além do biogás, uma corrente aquosa rica em matéria orgânica conhecido como digestato. No modelo, parte dessa corrente será recirculada para a entrada

no digestor anaeróbio com taxa de reciclo $R = 1,0$, o que representa um recurso para o aumento do rendimento global da digestão, mas que, se muito elevado, pode inibir a produção de biogás devido ao acúmulo de certos nutrientes, como o nitrogênio (ZHENG et al, 2020).

A parte da corrente de digestato que não é recirculada é separada por meio de uma prensa de rosca, em duas outras correntes, sendo uma delas concentrada em sólidos e outra, naturalmente diluída quanto a este teor. A corrente concentrada é chamada de digestato sólido, que é seca com o calor gerado pela unidade de cogeração da usina e sai do sistema com teor de 80% de sólidos para aplicação no solo sem atribuição de qualquer carga ambiental. Isso ocorre em todos os cenários.

Já a corrente diluída, chamada de digestato, tem diferentes destinos a depender do cenário analisado. Três diferentes opções foram avaliadas neste caso: descarte direto, tratamento em estação de tratamento de efluente (ETE), e aplicação ao solo como corretor de solo. Dados médios da literatura a respeito da composição química do digestato (BACHMANN et al (2015); PANUCCIO et al (2016); TAMBONE et al (2017); GUANGDOU et al (2020) foram considerados para a mensuração do impacto ambiental em cada cenário e os valores adotados no estudo estão disponíveis na Tabela 4.7, todos relacionados à composição de digestato líquido de planta de biogás alimentada com esterco bovino. No caso do descarte direto, a corrente de digestato foi considerada como emissão ligada à produção de biogás. Para os cenários com tratamento em ETE, as emissões consideradas foram caracterizadas pelas correntes de saída da etapa de tratamento, bem como aquelas relacionadas à operação da própria ETE. Por fim, para os cenários com aplicação no solo, nenhuma emissão referente ao digestato foi atrelada à geração elétrica a partir de biogás, uma vez que o digestato foi considerado como produto provido de valor agregado e portanto recebe as cargas ambientais ligadas a sua produção com alocação feita entre o esta e o biogás baseada no teor de carbono das correntes.

Tabela 4. 7 - Composição do digestato líquido.

Caracterização química do digestato líquido		
Parâmetro	Unidade	Valor médio
DQO	mg/L	37982
DBO	mg/L	6457
Fenóis	mg/kg ST	5642
Hidrocarbonetos	mg/kg ST	471
pH	-	8,15
K ₂ O	mg/kg ST	30221
P ₂ O ₅	mg/kg ST	24757
N-NH ₄ ⁺	mg/kg ST	25544
Ca ²⁺	mg/kg ST	25737
Mg ²⁺	mg/kg ST	7972
Mn	mg/kg ST	603
Zn	mg/kg ST	356
Cu	mg/kg ST	174
Ni	mg/kg ST	78,6
Co	mg/kg ST	69,8
Pb	mg/kg ST	2,41
Cd	mg/kg ST	0,32
Cr	mg/kg ST	5,50
Fe	mg/kg ST	Variável

Fonte: Adaptado de BACHMANN et al (2015); PANUCCIO et al (2016); TAMBONE et al (2017); GUANGDOU et al (2020)

Tabela 4. 8 - Cenários definidos para a análise. M: Ajuste cinético com os parâmetros de Mushtaq et al (2022); R: Ajuste cinético com os parâmetros de Ranjbar et al (2022).

Cenário	Local	Tipo de substrato	Cinética	Destino do digestato
C1	Aveiro	Palha de milho	M	Descarte
C2	Aveiro	Palha de milho	R	Descarte
C3	Aveiro	Palha de arroz	R	Descarte
C4	Prainha	Palha de milho	M	Descarte
C5	Prainha	Palha de milho	R	Descarte
C6	Porto de Moz	Palha de milho	M	Descarte
C7	Porto de Moz	Palha de arroz	M	Descarte
C8	Porto de Moz	Palha de milho	R	Descarte
C9	Porto de Moz	Palha de arroz	R	Descarte
C10	Aveiro	Palha de milho	M	ETE

C11	Aveiro	Palha de milho	R	ETE
C12	Aveiro	Palha de arroz	R	ETE
C13	Prainha	Palha de milho	M	ETE
C14	Prainha	Palha de milho	R	ETE
C15	Porto de Moz	Palha de milho	M	ETE
C16	Porto de Moz	Palha de arroz	M	ETE
C17	Porto de Moz	Palha de milho	R	ETE
C18	Porto de Moz	Palha de arroz	R	ETE
C19	Aveiro	Palha de milho	M	Aplicação
C20	Aveiro	Palha de milho	R	Aplicação
C21	Aveiro	Palha de arroz	R	Aplicação
C22	Prainha	Palha de milho	M	Aplicação
C23	Prainha	Palha de milho	R	Aplicação
C24	Porto de Moz	Palha de milho	M	Aplicação
C25	Porto de Moz	Palha de arroz	M	Aplicação
C26	Porto de Moz	Palha de milho	R	Aplicação
C27	Porto de Moz	Palha de arroz	R	Aplicação

4.2.4 Modelagem em ACV

A avaliação do ciclo de vida (ACV) para cada cenário de geração elétrica a biogás foi realizada de acordo com as diretrizes determinadas pela norma ISO 14044 com uma abordagem atribucional para unidade funcional sendo 1 kWh de energia elétrica ofertado à comunidade. A análise foi realizada para os 27 cenários de geração elétrica a biogás, o cenário de interligação ao grid e os cenário base de geração de eletricidade com a combustão de óleo diesel . A modelagem do sistema foi realizada com o auxílio do software especializado SimaPro 9.3.0.3, que aplica os inventários Ecoinvent. A definição de objetivos e escopo e a análise de inventário são descritas a seguir.

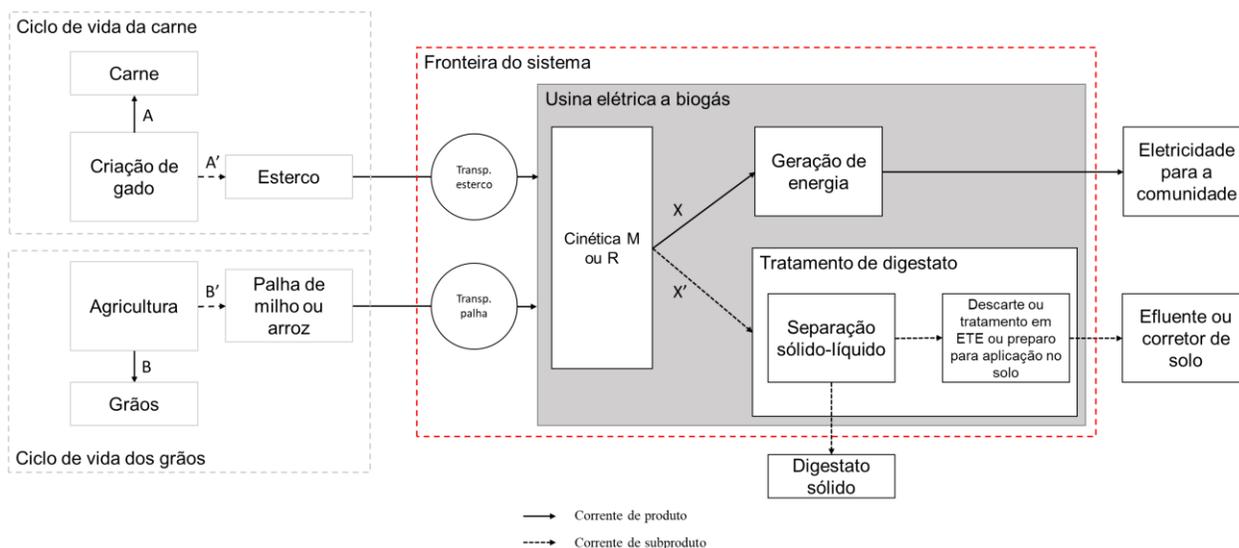
4.2.4.1 Definição de objetivos e escopo

O escopo da análise se configura “do berço ao portão” e compreende desde a coleta da biomassa no campo até a produção do produto que atende à necessidade primária, energia elétrica, considerando, para isso, todas as emissões envolvidas no processo. As cargas envolvidas tanto na produção da biomassa que será aplicada como substrato da usina, quanto na distribuição de energia elétrica e aplicação de digestato como fertilizante não são abarcados no escopo do ciclo de vida da

usina, a justificativa é o tratamento de rejeito dado ao esterco, cujas cargas ambientais são totalmente atribuídas à produção de proteína animal, e o fato de que a distribuição de energia elétrica ocorrer da mesma maneira independentemente da fonte de produção de energia.

No presente estudo, as cargas ambientais relacionadas à construção das usinas de geração elétrica não foram abarcadas na avaliação, os motivos são a alta incerteza dos parâmetros ambientais ligadas a construção civil na região, a falta de fontes seguras para a obtenção de dados desse tipo e a diluição dos impactos no tempo de vida do empreendimento, considerado de aproximadamente 30 anos. Um fluxograma simplificado da abordagem da ACV aplicada ao processo de geração de energia a biogás está representado na Figura 4.4.

Figura 4. 4 - Fluxograma simplificado da abordagem do estudo pela ACV.



Os inventários de ciclo de vida aplicados para o estudo foram elaborados a partir de dados secundários obtidos de relatórios dos bancos de dados do Ecoinvent e adaptados para se adequarem às condições de operação de processos no Brasil com o auxílio de relatórios técnicos e mapas referentes ao ano de 2021, como é o caso das emissões associadas à geração de energia que compõe o grid regional (FRISCHKNECHT et al, 2007; EPE, 2020) e ao transporte pela extensão das estradas nacionais, além de insumos em diversos ciclos de vidas da cadeia de valor do processo estudado que foram substituídos por insumos de produção nacional e logísticas alimentadas com modais e distâncias referentes à Amazônia.

A modelagem ambiental começa pela obtenção do esterco e palha de milho ou de arroz no campo, ambos estes substratos são considerados rejeitos de processos anteriores (produção de alimento) uma vez que atualmente não possuem qualquer valor comercial, portanto, devido a uma abordagem atribucional, são isentas de cargas ambientais. A logística de obtenção de substratos foi adequada à realidade das cidades de Aveiro, Prainha e Porto de Moz a depender do cenário analisado.

Para os cenários de C1 a C18 a energia elétrica é o único produto considerado na ACV, portanto a geração de digestato líquido e seus derivados são consideradas emissões do processo de geração elétrica. Já para os cenários C19 a C27, nos quais o digestato também é tratado como produto, caracteriza-se uma situação de multifuncionalidade. As cargas foram distribuídas entre as correntes de biogás e de digestato por meio de fator de alocação baseado no teor mássico de carbono em cada corrente. Desta forma, apenas parte das cargas ambientais do processo de digestão anaeróbia é atribuída ao biogás e à eletricidade gerada a partir dele, uma vez que uma parcela dessas cargas é associada a outro sistema de produto, o melhoramento de solo para o cultivo agrícola.

Esse parâmetro variou de acordo com o cenário analisado entre 46% e 49% para a corrente de biogás e, portanto, de 51% a 54% para o digestato. A escolha do teor de carbono como fator de alocação para a situação de multifuncionalidade está de acordo com a norma ISO 14044 (ISO, 2006) que sugere o uso de uma grandeza física para a alocação de cargas.

Para os cenários de C10 a C18, que correspondem àqueles referentes ao tratamento do digestato como efluente em uma estação de tratamento, foi aplicado um inventário do banco de dados do Ecoinvent referente à uma estação de tratamento de óleos vegetais (DOKA, 2009). Essa escolha foi feita devido à semelhança físico-química entre o efluente tratado pela estação descrita no banco de dados e o efluente referente ao digestato da usina de biogás dimensionada, porém, modificações foram realizadas para melhor adequação à realidade da região, tais como: Resíduos sólidos gerados pela ETE foram tratados com aterramento sanitário ao invés de incineração, as energias elétrica e térmica necessárias para a operação da ETE advêm da própria usina a biogás, os químicos utilizados são produzidos nacionalmente. A ETE aplicada no estudo possui eficiência de 85% de redução de demanda química por oxigênio (DQO) do efluente e está localizada nas dependências da usina, portanto não há necessidade de transporte entre a usina elétrica e a estação de tratamento.

Também foram consideradas, na modelagem ambiental da usina, emissões de metano devidas a perdas no processo. Esta medida foi vinculada a uma fração do total da produção de metano pela usina e seu valor foi obtido com valores médios encontrados na literatura para plantas de biogás com características semelhantes às aquelas do modelo, sendo de 2,9% do volume de produção de metano da planta. (FREDENSLUND et al, 2018; SHEUTZ e FREDENSLUND, 2019; HRAD et al, 2015; BAKKALOGLU et al, 2021).

Os transportes são estimados através de dados da última pesquisa pecuária municipal (IBGE, 2020a) e pesquisa agrícola municipal (IBGE, 2020b), juntamente com dados obtidos da ferramenta de medidas de distâncias do Google Maps. A produção de resíduos das atividades agropecuárias do município (esterco e palha de milho ou de arroz) foi considerada como estando distribuída igualmente pelas áreas destinadas a atividades rurais locais, assim, foi realizada uma estimativa aproximada da área agrícola necessária para o abastecimento da usina a biogás com esterco e palha suficientes para o atendimento à demanda elétrica local, e conseqüentemente, das distâncias percorridas por caminhões e/ou barcaças a diesel destas áreas de abrangência até a usina.

No caso do abastecimento da usina com palha de milho ou arroz, também foi considerada a distância da usina a biogás até as áreas de produção agrícola de um município vizinho a cada uma das localidades consideradas no estudo, uma vez que as produções locais foram insuficientes. Os caminhões usados para efeito de estimativa dos desempenhos ambientais do estudo foram definidos como sendo do tipo Euro 3, a fim de atribuir maior carga ambiental a transportes em áreas com infraestrutura viária de baixa qualidade, como é o caso das estradas da região amazônica.

Observando-se a origem dos insumos e a destinação das emissões associadas aos processos de produção energética propostos, além da finalidade dos produtos gerados no processo em estudo, foram selecionadas seis categorias de impacto, pelo método de caracterização *midpoint*, para representar o desempenho ambiental dos cenários estabelecidos. São eles: Potencial de aquecimento global (GWP) pelo método *IPCC 2013 GWP 100a VI.03* (HODNEBROG et al, 2013), demanda primária de energia (PED) pelo método *Cumulative Energy Demand VI.11* (FRISCHKNECHT et al, 2003) e ecotoxicidade em água fresca (FWET) pelo método *ReCiPe 2016 Midpoint (H) VI.04* (HUIJBREGTS et al, 2017). O primeiro método faz uso do modelo que se baseia no horizonte temporal de 100 anos publicado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), o segundo inclui toda forma de energia direta e indireta usada para transformar recursos em insumos (ou bens de produção), e estes em produtos (bens de consumo) e o último é

usado por diversos trabalhos na área ambiental por ser considerada uma sólida metodologia para medidas de toxicidade de modo geral.

4.2.4.2 Análise de inventário

Com a construção do modelo de usina de geração elétrica a biogás, as correntes de entradas e emissões associadas à produção de uma unidade de energia ofertada à comunidade (1,0 kWh) foram estabelecidas e apresentadas na Tabela 4.9. As principais entradas para o funcionamento da planta de biogás são esterco bovino, palha de milho, palha de arroz, água, cloreto de ferro III (FeCl₃) e as atividades de transporte desses materiais. As emissões são basicamente relacionadas às correntes de digestato líquido, metano e gás carbônico. É importante destacar que os gases metano e gás carbônico emitidos pela planta são considerados de origem biogênica.

Tabela 4. 9 - Quadro sinótico descrevendo os principais consumos e emissões associados a cada cenário de planta a biogás. b – origem biogênica.

Cenário	Entradas						Saídas		
	Esterco kg/kWh	Palha de milho kg/kWh	Palha de arroz kg/kWh	Água kg/kWh	FeCl ₃ g/kWh	Atividade de transporte t.km/kWh	Digestato líquido kg/kWh	CH ₄ , b g/kWh	CO ₂ , b kg/kWh
C1	5,533	0,531	-	1,700	2,566	0,050	6,281	7,813	1,232
C2	5,427	0,522	-	1,590	3,306	0,046	6,119	7,838	1,235
C3	6,166	-	0,494	0,846	3,269	0,051	6,051	7,804	1,221
C4	5,533	0,531	-	1,700	2,566	0,048	6,282	7,813	1,232
C5	5,412	0,521	-	1,586	3,298	0,040	6,103	7,817	1,232
C6	5,559	0,532	-	1,706	2,573	0,096	6,309	7,845	1,237
C7	6,287	-	0,502	0,950	2,541	0,089	6,218	7,812	1,221
C8	5,428	0,522	-	1,591	3,307	0,093	6,121	7,840	1,235
C9	6,169	-	0,495	0,846	3,271	0,087	6,055	7,809	1,222
C10	5,798	0,556	-	1,781	2,689	0,053	6,583	8,188	1,291
C11	5,680	0,546	-	1,665	3,461	0,048	6,405	8,204	1,293
C12	6,450	-	0,517	0,885	3,420	0,053	6,330	8,164	1,278
C13	5,799	0,556	-	1,782	2,689	0,050	6,583	8,188	1,291
C14	5,664	0,545	-	1,660	3,451	0,042	6,387	8,181	1,289
C15	5,827	0,558	-	1,788	2,697	0,100	6,613	8,223	1,297
C16	6,585	-	0,526	0,995	2,661	0,094	6,513	8,183	1,279
C17	5,682	0,547	-	1,665	3,462	0,098	6,407	8,206	1,293
C18	6,454	-	0,518	0,885	3,422	0,091	6,334	8,169	1,279
C19	5,533	0,531	-	1,700	2,566	0,050	6,281	7,813	1,232

C20	5,427	0,522	-	1,590	3,306	0,046	6,119	7,838	1,235
C21	6,166	-	0,494	0,846	3,269	0,051	6,051	7,804	1,221
C22	5,533	0,531	-	1,700	2,566	0,048	6,282	7,813	1,232
C23	5,412	0,521	-	1,586	3,298	0,040	6,103	7,817	1,232
C24	5,559	0,532	-	1,706	2,573	0,096	6,309	7,845	1,237
C25	6,287	-	0,502	0,950	2,541	0,089	6,218	7,812	1,221
C26	5,428	0,522	-	1,591	3,307	0,093	6,121	7,840	1,235
C27	6,169	-	0,495	0,846	3,271	0,087	6,055	7,809	1,222

4.2.2.1. Cálculo do Indicador Ambiental Único

O desenvolvimento de um indicador único é descrito nas normas ISO 14044 como um procedimento não obrigatório da etapa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (ISO, 2006). Esta prática foi aplicada com sucesso em diferentes circunstâncias onde são necessárias comparações de cenários (FLORINDO et al, 2020; MOORE et al, 2019; MORITA et al, 2020). A comparação entre cenários aplicando diferentes categorias de impacto, nos quais as tendências dos desempenhos ambientais diferem entre si, torna-se uma tarefa complicada e muitas vezes inconclusiva. O desenvolvimento de um indicador ambiental único (IAU) que considere simultaneamente todos os resultados do estudo de ACV pode ser uma solução atraente para auxiliar a tomada de decisão em casos como este. O cálculo do IAU foi realizado de acordo com a equação Eq. 2, onde GWP_i , PED_i e $FWET_i$ são as categorias de impacto correspondentes ao cenário (i) ou cenário base, que no presente estudo é aquele cuja fonte de energia é o óleo diesel.

$$IAU = \left(\frac{GWP_i}{GWP_{base}} + \frac{PED_i}{PED_{base}} + \frac{FWET_i}{FWET_{base}} \right) \times \frac{1}{3} \quad \text{Eq. 2}$$

4.2.2.2. Comparação entre cenários

Vale destacar que a comparação entre os cenários do estudo ocorre não apenas entre os 27 cenários de geração elétrica a biogás, mas também destes com o cenário de interligação das localidades com a rede regional (grid) do Sistema Interligado Nacional e com o cenário de obtenção de energia através da queima de óleo diesel, que é o que acontece atualmente nas localidades estudadas, portanto, este é considerado o cenário base. As cargas ambientais atribuídas ao abastecimento através do grid é oriunda apenas das fontes de geração elétrica que compuseram a

matriz no ano de 2020, o que significa que os impactos relacionados a transmissão de energia elétrica como supressão vegetal, construção de torres de transmissão e perdas de transmissão elétrica não foram abarcadas nos estudos. Já a geração de energia a partir da queima de óleo diesel inclui a produção e transporte desse combustível para a Amazônia e as emissões da queima deste para a geração elétrica.

4.2.2.3. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade indica a dependência de uma determinada característica do sistema em relação a uma determinada variável de entrada definida (OGUNJUYIGBE e AYODELE, 2016). No presente estudo, também foi realizada uma análise de sensibilidade para determinar a influência de certas variáveis de processo no desempenho ambiental da usina de biogás. Para tanto, foi selecionado o cenário com melhor desempenho ambiental para facilitar a compreensão e discussão dos resultados. Em seguida, diversos parâmetros de processo que apresentam certo grau de incerteza e potencial para alterar o impacto ambiental do sistema foram escolhidos para avaliar sua sensibilidade.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

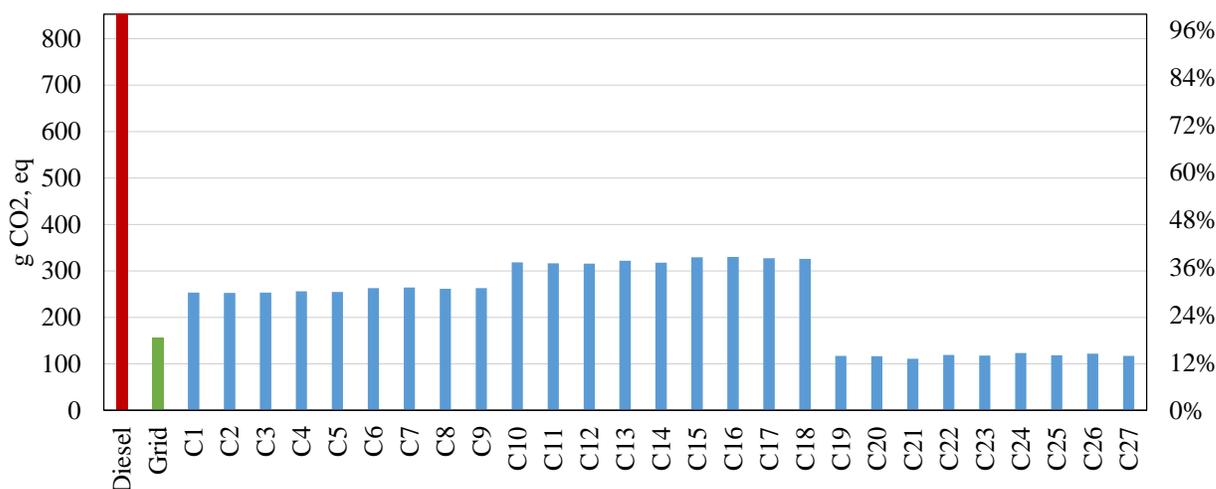
Os resultados da ACV para as categorias de impacto propostas são apresentados e discutidos nas sessões a seguir, juntamente com uma avaliação feita através da criação de um indicador ambiental único que leva em consideração a combinação de todos os resultados obtidos.

4.3.3 Potencial de aquecimento global (GWP)

Os resultados da avaliação ambiental referentes ao potencial de aquecimento global (GWP) dos 27 cenários de usina de geração elétrica a biogás são apresentados na Figura 4.5, onde é possível observar uma diferença mais pronunciada entre os grupos de cenários que divergem quanto ao destino final do digestato, e na Tabela 4.10 é possível observar os mesmos valores também comparados à contribuição das emissões de gás metano para o indicador. Também são

mostrados na Figura 4.5 o resultado ambiental do fornecimento de energia a diesel (cenário atual) e do abastecimento através do Sistema Interligado (grid).

Figura 4. 5 - Resultados dos cenários para Potencial de aquecimento global



Para todos os cenários, a principal contribuição para GWP advém das emissões de metano, que não são aproveitadas para a geração de energia, tais emissões são decorrentes de possíveis vazamentos em tubulações condutoras de biogás, da fermentação anaeróbia nos tanques de armazenamento de substrato e da continuação da geração de metano mesmo fora do biodigestor anaeróbio, nos tanques de digestato, uma vez que este ainda possui alta carga orgânica (FREDENSLUND et al, 2018; SHEUTZ e FREDENSLUND, 2019; HRAD et al, 2015; BAKKALOGLU et al, 2021). As emissões de metano contribuem em mais 75% das emissões de gases do efeito estufa das operações de plantas de biogás para todos os casos, como pode ser observado na Tabela 4.10.

Tabela 4. 10 - Potencial de aquecimento global e a participação de CH₄ no indicador para os cenários de usinas a biogás.

Cenário	GWP _{total} (kg CO ₂ eq)	GWP _{CH₄(-)} (kg CO ₂ eq)	X CH ₄ (%)
C1	0,2513	0,0130	94,8
C2	0,2512	0,0121	95,2
C3	0,2519	0,0139	94,5
C4	0,2508	0,0125	95,0
C5	0,2495	0,0111	95,6

C6	0,2488	0,0095	96,2
C7	0,2484	0,0102	95,9
C8	0,2484	0,0093	96,3
C9	0,2480	0,0099	96,0
C10	0,3162	0,0665	79,0
C11	0,3143	0,0641	79,6
C12	0,3143	0,0653	79,2
C13	0,3157	0,0659	79,1
C14	0,3123	0,0628	79,9
C15	0,3138	0,0630	79,9
C16	0,3125	0,0629	79,9
C17	0,3114	0,0611	80,4
C18	0,3103	0,0611	80,3
C19	0,1165	0,0095	91,8
C20	0,1156	0,0092	92,1
C21	0,1101	0,0098	91,1
C22	0,1161	0,0092	92,1
C23	0,1146	0,0084	92,6
C24	0,1144	0,0072	93,7
C25	0,1088	0,0073	93,3
C26	0,1137	0,0072	93,6
C27	0,1074	0,0071	93,4

Os principais impactos na forma de CO_{2,eq} foram atribuídas aos cenários C10 a C18 se devem tanto às emissões relacionadas à operação da ETE, quanto ao fato de parte da produção da energia a biogás ser direcionada ao funcionamento das etapas de tratamento de efluentes líquidos, resultando em uma menor oferta de energia à população.

Por outro lado, os mais baixos impactos como GWP ocorreram para os cenários C19 a C27, e devem a uma questão metodológica importante: ao se considerar o digestato líquido como um produto com valor agregado, e não mais apenas como um subproduto atrelado a produção de energia a biogás, esta corrente passa a assumir as cargas ligadas diretamente a sua produção, desonerando, assim, a produção de energia a biogás. Além disso, devido ao fato de biogás e digestato compartilharem as mesmas etapas de processo até a saída do digestor anaeróbio, a partir do qual cada produto segue uma sequência própria de operações, as cargas ambientais geradas

nessas etapas comuns aos dois produtos são distribuídas entre eles de acordo com o fator de alocação baseado no teor de carbono de cada corrente.

Será também importante frisar que parte do digestato é realimentado no misturador e, em seguida, no digestor anaeróbio, reinserindo parte das cargas ambientais associadas à corrente de digestato nas etapas a montante. Neste caso, uma nova distribuição de cargas ocorre, desta vez com um critério mássico, baseado na taxa de reciclo determinada, que, no caso, é igual a 1, portanto a vazão de digestato que retorna ao digestor é igual àquela que segue para a destinação final, tal como suas cargas associadas.

Outra fonte importante de emissões de gás carbônico equivalente no processo estudado está ligada aos transportes dos substratos do campo até a localização das usinas, que é realizado com veículos movidos a diesel. Devido a diferenças nas atividades agropecuárias de cada localidades, diferentes distâncias precisam ser percorridas. Por exemplo, localidades onde as fazendas de produção de gado estão mais próximas entre si, ou seja, há maior densidade de cabeças de gado nas áreas produtivas, os transportes de esterco são considerados mais curtos. Aveiro, Prainha e Porto de Moz possuem, nesta ordem, o transporte mais curto, intermediário e mais longo para o suprimento das respectivas usinas com esterco. Porém, muito embora a demanda da planta por esterco seja em 10 vezes mais significativa que aquela por resíduos da plantação de grãos, as distâncias percorridas pelo co-substrato lignocelulósico (palha de milho e de arroz) são bastante mais elevadas, uma vez que a produção de palha de milho ou de arroz locais não se mostram suficientes para o abastecimento da usina a biogás do respectivo município.

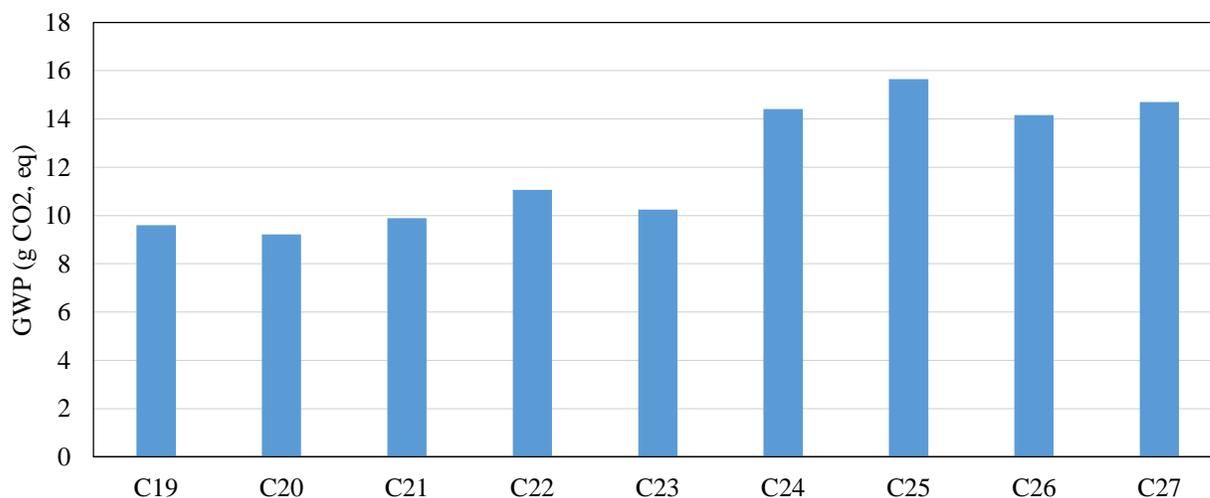
Sendo assim, as cargas ambientais associadas ao transporte de palha de um município vizinho até a planta foram bastante determinantes para os resultados referentes ao potencial de aquecimento global. A medida do tamanho do impacto ambiental do transporte de palha pode ser atribuído a dois fatores principais: a quantidade de massa a ser importada de um município vizinho até a usina e a distância desse vizinho até a planta. A Tabela 4.10 mostra a fração da alimentação de palha de milho e palha de arroz que deve ser abastecida por um município vizinho, a distância da localização da planta até a área rural do município vizinho e o total do trajeto que é realizada por cada modal logístico para o cenário de maior e de menor potencial de aquecimento global, C21 e C27.

Tabela 4. 11 - Dados de transporte de substratos para dois cenários selecionados.

Cenário	Localização	Fração de palha importada	Trajeto de substratos (km)			
			Rodoviário		Fluvial	
			Esterco	Palha	Esterco	Palha
C21	Aveiro	87%	4,62	122	0	0
C27	Porto de Moz	96%	16,23	32,8	0	137

Na Figura 4.6 é possível observar maiores diferenças entre as emissões dos cenários do estudo. Nela são mostrados apenas os resultados referentes às emissões associadas aos cenários de C19 a C27, nos quais o digestato é aplicado como corretor de solo e, portanto, mostram as menores impactos para GWP. Nestes casos, excetuando-se as contribuições das emissões de metano para o desempenho do sistema para essa categoria, o cenário C21 expressou um impacto 39% maior que o cenário C27. Ambos os cenários utilizam palha de arroz como co-substrato e operam segundo a mesma cinética de digestão anaeróbia, a diferença entre eles está na localização da planta: C21 tem a planta localizada em Aveiro, que, embora necessite de transportes mais curtos (Tabela 4.10), esse transporte é feito 100% através de modais rodoviários e C27 está em Porto de Moz, que a pesar de demandar por um transporte 40% mais longo que o de Aveiro, realiza 81% dele pelos rios da região.

Figura 4. 6 - GWP sem a contribuição das emissões de metano para os cenários de aplicação do digestato.



4.3.4 Demanda primária de energia (PED)

Os resultados da avaliação ambiental para PED (Figuras 4.7 e 4.8) sugerem uma desvantagem muito pronunciada do cenário com abastecimento energético a diesel em relação aos demais.

Figura 4. 7 - Resultados dos cenários para Demanda primária de energia.

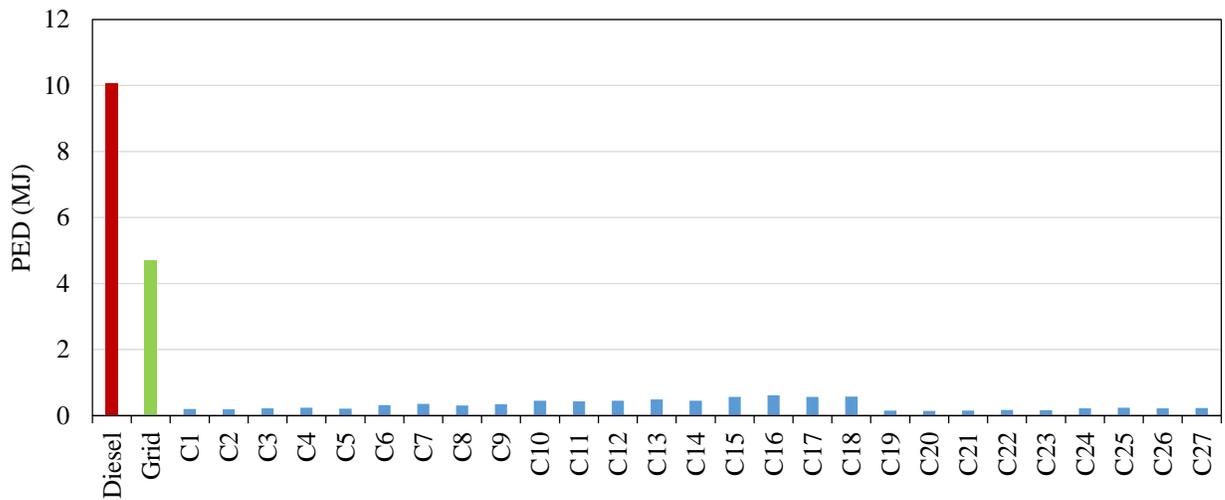
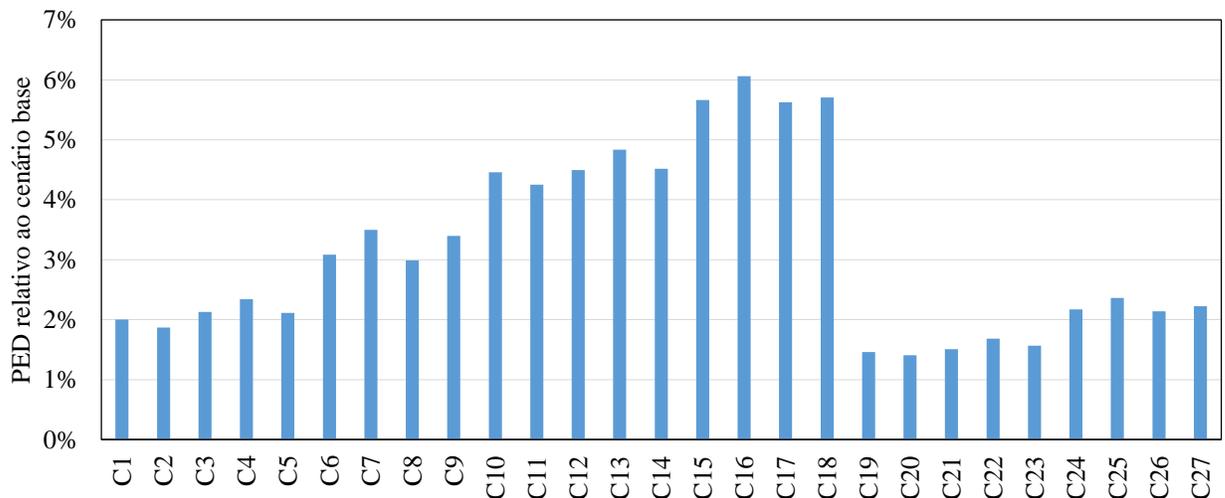


Figura 4. 8 - Resultados PED em relação ao cenário base (diesel).



A categoria de impacto relativa a PED é composta por seis parcelas relacionadas às seguintes fontes de energia: fósfil, nuclear, biomassa não-renovável, biomassa renovável, outros renováveis

(solar, eólica e geotérmica) e hidráulica, sendo que a maior participação para o indicador advém das fontes fósseis de energia, seguida da fonte hidráulica. Isso ocorre em todos os cenários, com exceção do cenário de abastecimento através do grid regional, para o qual a contribuição da fonte hidráulica é bem mais pronunciada.

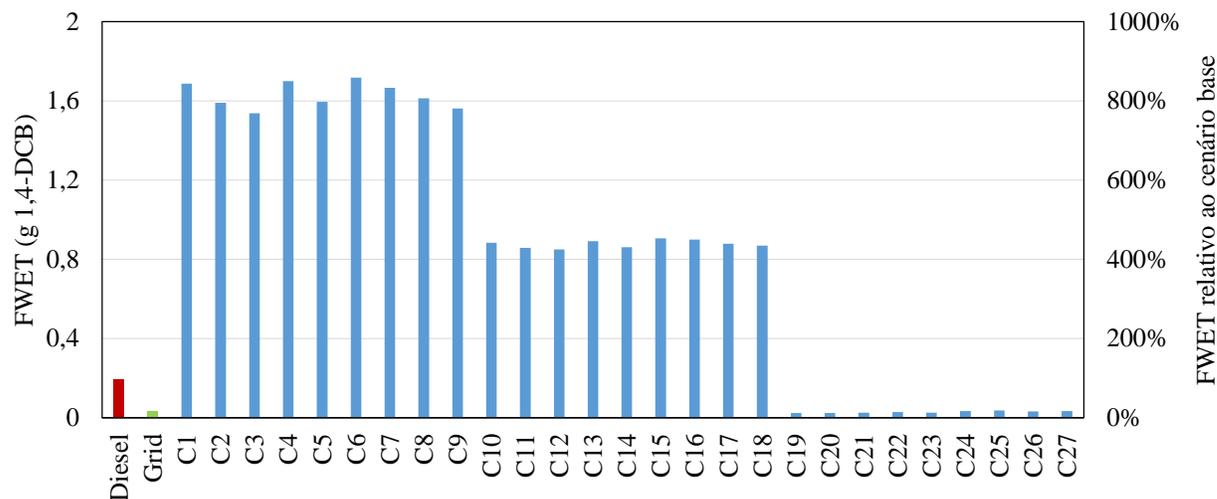
A Figura 4.8 mostra que nenhum cenário de fornecimento a biogás representou, em termos de demanda primária de energia, uma fração maior que 5% que o impacto gerado pela forma atual de abastecimento elétrico (o cenário a diesel) às localidades amazônicas consideradas no estudo. Também é possível perceber que o grupo de cenários de C10 a C18, aqueles que dispõem de uma ETE em operação, são aqueles que mais geram impacto em PED em relação aos demais cenários a biogás. Isso se deve ao fato de que a operação da ETE representa, não apenas um maior consumo de energia para a usina, mas também necessita do suprimento de insumos químicos para seu funcionamento. Tais insumos, como FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, e $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, geram grande quantidade de demanda energética para sua produção, portanto, contribuem fortemente para os maiores impactos observados para os cenários de C10 a C18.

Os menores impactos na categoria de PED são, nesta ordem, representados pelos cenários C27, C24 e C26, todos para a localização de Porto de Moz, para a qual os transportes de co-substrato lignocelulósico são feitos majoritariamente por modais aquaviários.

4.3.5 Ecotoxicidade em água fresca (FWET)

Sendo a forma como o digestato é disposto uma variável muito relevante para a análise ambiental da usina a biogás, também se faz importante avaliar o impacto ambiental desse subproduto na natureza. Na Figura 4.9 é apresentada a comparação entre os 27 cenários propostos e os cenários baseados no diesel e grid regional em relação a ecotoxicidade em água fresca (FWET).

Figura 4.9 - Resultados dos cenários para Ecotoxicidade em água fresca absolutos e em relação ao cenário base (diesel).

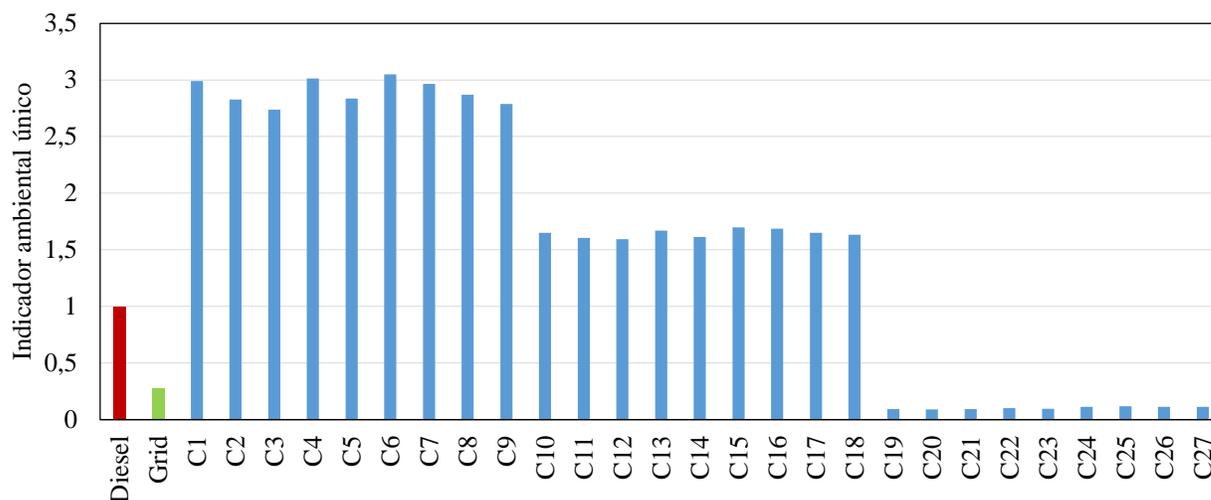


A composição do digestato considerada para o estudo (descrita na Tabela 4.8 da sessão 4.2.3.4) possui uma série de substâncias que aumentam o impacto na categoria de ecotoxicidade. A disposição desse subproduto sem qualquer tratamento provoca grandes problemas ambientais como é indicado pelos valores bastante elevados de FWET para os cenários de C1 a C9 que chegam a ser nove vezes maiores quando comparados ao cenário base. O tratamento do digestato em ETE reduz consideravelmente sua ecotoxicidade, porém ainda resulta em valores de FWET superiores àqueles associados à produção de energia a diesel. Sendo assim, do ponto de vista da produção de energia a biogás, a melhor alternativa para a destinação do digestato é sua revalorização, uma vez que esta melhoria técnico-econômica reduz substancialmente a ecotoxicidade ligada a produção de biogás.

4.3.6 Indicador ambiental único

Uma comparação entre os cenários utilizando-se diversas categorias de impacto e na qual as performances ambientais variam de acordo com a categoria analisada se torna uma tarefa complicada, portanto, a criação de um indicador ambiental único que leva em consideração todos os resultados da ACV do estudo se mostra como uma solução interessante no auxílio a uma tomada de decisão. A Figura 4.10 reúne os 27 cenários prospectivos de usinas elétricas a biogás na Amazônia mais os casos de fornecimento a diesel e interligação ao grid.

Figura 4. 10 - Comparação dos cenários quanto ao indicador ambiental único.



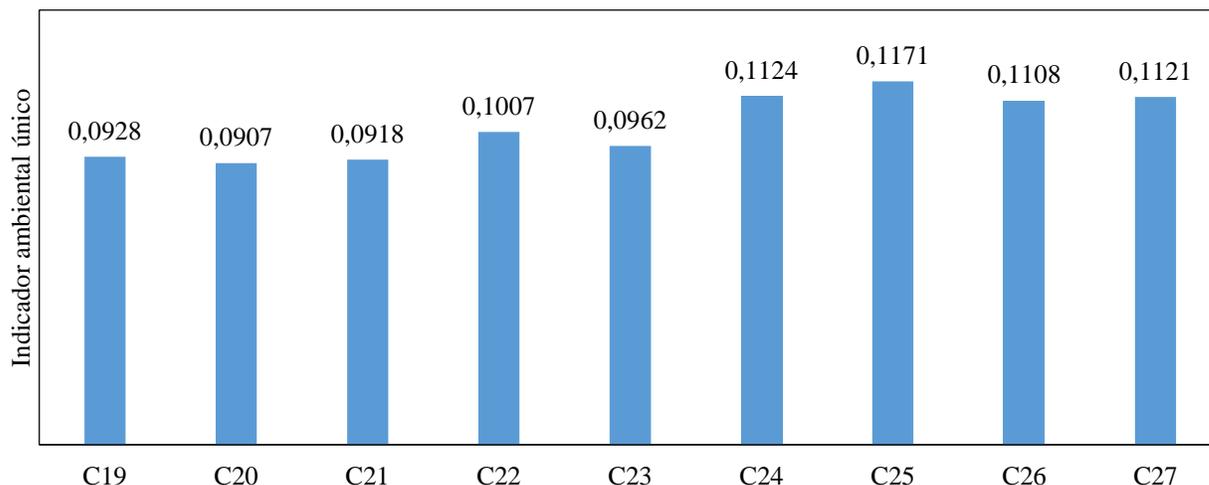
Embora todos os cenários de energia a biogás tenham apresentado um desempenho melhor em relação a GWP e PED quando comparadas aos cenários de energia a diesel, na Figura 4.10 é possível observar que a grande desvantagem dos cenários de C1 a C18 em relação ao impacto ligado a ecotoxicidade os tornam cenários menos vantajosos quando comparados ao cenário base. Sendo assim, apenas os cenários de C19 a C27 são mais interessantes do ponto de vista ambiental do que o cenário base, o que implica na importância da inserção do digestato líquido nas cadeias produtivas.

Uma comparação apenas dos cenários de revalorização do digestato, aqueles de C19 a C27, mostrado na Figura 4.11, indica que os cenários cuja planta de biogás atende a população de Aveiro apresentaram melhor desempenho ambiental, o que está ligado às menores distâncias e aos menores consumos de substrato.

Deste grupo, observando-se apenas os cenários com localização em Porto de Moz, C24, C25, C26 e C27, a avaliação daqueles que variaram quanto ao tipo de co-substrato e modelo cinético não mostraram diferenças significativas entre si. Isto pode ser observado na Figura 12, quando resultados de medida de indicador ambiental único para os cenários da localidade de Porto de Moz e digestato revalorizado foram comparados e a variação entre os cenários C24 e C25, que operam ambos segundo a cinética M e diferem apenas no tipo de co-substrato (palha de milho para C24 e palha de arroz para C25) apresentaram apenas 4% de diferença entre si com menor impacto para o uso da palha de milho, tal diferença foi apenas um pouco maior que entre os cenários C26 e C27, que operam com a cinética R, 1,2%. Isso significa que a vantagem do uso de palha de milho é

apenas levemente mais indicada que o uso da palha de arroz do ponto de vista ambiental na localidade de Porto de Moz.

Figura 4. 11 - Indicador único para os cenários com aproveitamento de digestato.



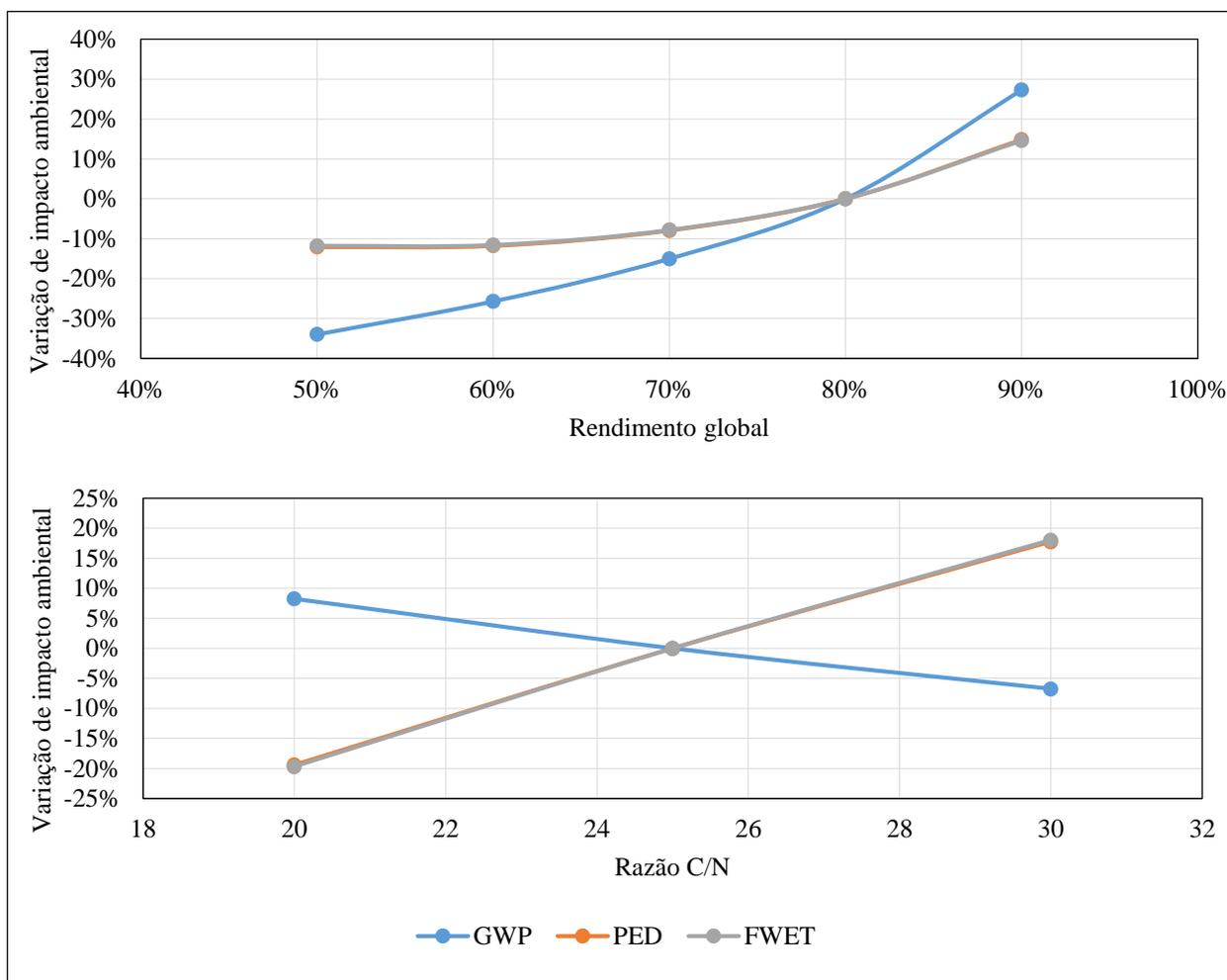
Quando a comparação é feita fixando-se o co-substrato e variando-se a cinética, tanto para os cenários de usinas alimentadas com palha de arroz quanto com palha de milho, a aplicação de uma cinética mais lenta, a cinética R, se mostrou levemente mais vantajosa do ponto de vista ambiental, o que demonstra que, embora uma cinética que produza mais energia se mostre interessante do ponto de vista econômico, o menor uso de substrato apresenta maiores vantagens ambientais, pelo menos quando comparadas as cinéticas M e R aplicadas neste estudo.

4.2.3. Resultados da análise de sensibilidade

Duas variáveis de processo foram escolhidas para uma análise de sensibilidade: rendimento global de biogás e a razão C/N. Essa escolha deveu-se à influência dessas variáveis em muitos parâmetros operacionais do modelo de usina a biogás avaliado, ou seja, aumentos no rendimento global da usina levam ao aumento do TDH e à diminuição das taxas de alimentação do digestor, ao passo que variações da razão C/N são obtidas através da variação da composição do substrato, ou seja, variações das proporções de esterco e palha, o que também implica em mudanças na massa e distância do co-substrato transportado. Os resultados da análise de sensibilidade são

representados na Figura 4.12, nela é possível observar que as curvas relativas a PED e FWET estão sobrepostas. Isso pode ser explicado pelo fato de que PED e FWET são categorias cujo impacto advém basicamente do consumo de substrato e, como tanto o rendimento, quanto a razão C/N modificam a taxa de alimentação da usina, essas categorias de impacto acabam variando na mesma medida. GWP também sofre influência da alimentação de substrato, porém essa não é a única fonte de variação do indicador.

Figura 4. 12 - Variações da categoria de impacto devido ao rendimento global e devido às relações C/N.



A Figura 4.12 indica que o rendimento global afeta diretamente, mas não linearmente, todas as três categorias de impacto avaliadas. O GWP provou ser mais sensível às variações de rendimento global do que as categorias PED e FWET. Por exemplo, um aumento de rendimento geral de 80% para 90% representou um aumento de 27% sobre o valor GWP e 15% para PED e

FWET, enquanto uma redução de rendimento global de 80% para 70% levou a reduções de apenas 15% de GWP e 8% de PED e FWET. No caso da sensibilidade do sistema à razão C/N, as variações das categorias de impacto foram praticamente lineares, embora com tendências distintas. Um aumento de 5 unidades na razão C/N aumentou PED e FWET em cerca de 20%, mas reduziu o GWP em 7%.

4.4 CONCLUSÃO

Os resultados da avaliação do ciclo de vida para alternativas mais sustentáveis que o uso de combustíveis fósseis, no que diz respeito ao abastecimento energético de municípios da Amazônia brasileira, mostraram que o aproveitamento de resíduos de atividades agropecuárias para a geração de energia elétrica a partir de biogás se mostrou bastante vantajoso do ponto de vista ambiental para todas as variações testadas em duas das três categorias de impacto ambiental analisadas: Potencial de aquecimento global e Demanda primária de energia. Para a categoria de ecotoxicidade em água fresca o estudo também apontou vantagens para a geração a biogás, desde que um esforço seja empregado para inserção do digestato em uma cadeia de suprimento.

Todas as localidades do estudo poderiam ser atendidas por uma usina de geração elétrica a biogás, pois estão localizadas em regiões onde a atividade agropecuária gera resíduos suficientes para o atendimento da demanda energética da comunidade. O município de Aveiro se destacou nos índices ambientais devido sua maior atividade agropecuária em combinação com a menor demanda energética, o que faz com que as atividades de transporte sejam reduzidas. Suas menores dimensões também reduzem suas necessidades de insumos, o que representa uma redução nos impactos.

Tanto palha de arroz como palha de milho poderiam ser utilizadas como co-substrato para uma planta de biogás em operação na Amazônia, sem que grandes prejuízos sejam gerados ao ambiente. E a avaliação do impacto ambiental de usinas a biogás que operam com uma cinética mais rápida ou mais lenta também indicou o embasamento do processo na cinética M ou R não foram traduzidos em grandes diferenças entre si. Isso significa que qualquer cinética próxima aos parâmetros descritos por Mushtaq et al (2022) ou Ranjbar et al (2022) teriam resultados em termos ambientais próximos aos descritos no presente trabalho.

Por fim, os resultados do estudo mostraram que, desde que haja uma destinação adequada do digestato, qualquer geração de energia a biogás em municípios em sistemas isolados com demandas

elétricas entre 0,3 a 2 MW, a partir de esterco bovino utilizando palha de milho ou de arroz e com cinéticas próximas a M ou R se mostram mais positivas para o meio ambiente que a atual forma de produção de energia elétrica para os sistemas isolados da Amazônia, a quase exclusiva combustão do óleo diesel.

5 VIABILIDADE SOCIAL DA GERAÇÃO ELÉTRICA A BIOGÁS EM COMUNIDADES AMAZÔNICAS ATRAVÉS DA DETERMINAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO HUMANO DOS TRABALHADORES

Denis da Silva Miranda¹, Jaylton Bonacina de Araujo², Luiz Kulay^{1,*}

¹ Chemical Engineering Department, Polytechnic School, University of São Paulo (USP),
São Paulo, Brazil

² Graduate Program in Urban Environmental Sustainability (PPGSAU), Federal University
of Technology Paraná (UTFPR), Curitiba, Brazil

* Corresponding Author E-mail: luiz.kulay@usp.br

Keywords: Biogas, Life cycle assessment, Amazon, Energy production, Social assessment

RESUMO

Buscando apoiar um caminho de desenvolvimento mais sustentável para a Amazônia brasileira através do uso consciente de recursos e, do envolvimento ativo da população local, este estudo se propõe a verificar efeitos sociais da geração de energia de origem renovável em localidades altamente dependentes de combustíveis fósseis daquela região. Para isso, o IDH-T, um indicador análogo ao índice de desenvolvimento humano (IDH) foi determinado para o grupo de trabalhadores envolvidos na cadeia de geração elétrica comparando a rota de geração atual com uma proposta de geração a biogás produzido de resíduos locais. A obtenção do índice de desenvolvimento humano dos trabalhadores (IDH-T) mostrou que o impacto social da geração alternativa a biogás não apresenta desvantagem significativa em relação a geração de energia a partir do óleo diesel com a vantagem de empregar até 6 vezes mais atores locais na cadeia de geração elétrica, o que pode contribuir significativamente para a redução das desigualdades em regiões bastante empobrecidas da Amazônia.

5.1.INTRODUÇÃO

A partir dos anos 1980 o Brasil experimentou uma grande expansão do sistema de distribuição de energia elétrica, aumentando de 45% para 93% a fração da população abastecida com energia, em um período de 15 anos (SÁNCHEZ et al, 2015). Tal expansão ocorreu de maneira bastante desigual e em 1995, embora as regiões sul e sudeste já contassem com 99% da população abastecida eletricamente, mais de um quarto da população da Amazônia, no norte do país, ainda não podia usufruir desse direito.

Hoje, o Brasil possui taxas quase plenas de universalização da energia elétrica (ONS, 2020), graças a investimentos na interligação de seus municípios ao Sistema Interligado Nacional (SIN), e a implantação de sistemas isolados que suprem as demandas de comunidades apartadas daquele domínio (BEZERRA et al, 2022). Há, porém, questões importantes a serem solucionados, para que determinadas localidades brasileiras superem a condição de ‘pobreza energética’ em que se encontram (BEZERRA et al, 2022). O principal deles consiste da erradicação definitiva da desigualdade na distribuição de eletricidade no país, que faz com que quase 1 milhão de residentes na região amazônica sigam ainda sem acesso a esse serviço (IEMA, 2018). Em termos de planejamento energético essa lacuna é contornada pela instalação de sistemas isolados movidos por variadas fontes energéticas, dentre as quais a combustão de óleo diesel ainda é a mais importante (ONS, 2020).

O uso de diesel para geração de energia é bastante controverso. Do ponto de vista ambiental, a opção por esse derivado fóssil vai de encontro às metas de descarbonização estabelecidas em nível internacional (IPCC, 2022). Sob a perspectiva econômica, além do preço dessa *commodity* energética ter quadruplicado no mercado externo entre 2002 e 2022 (EIA, 2022), seu custo para consumo na região Norte supera em 18% aquele praticado no Sul do Brasil (BEZERRA et al, 2022), também vale destacar os enormes subsídios à manutenção dos sistemas isolados, que apenas em 2022 foi de aproximadamente R\$ 10 bilhões, quase 20% maior do que o orçamento aprovado para 2021 (CCEE, 2022). No entanto, as desvantagens do uso do diesel como fonte energética se intensificam quando inseridas no contexto da Amazônia brasileira. Mesmo diante das dificuldades logísticas para sua distribuição, a região é altamente dependente desse combustível, exibindo um consumo per capita de 368 L/ano, que supera em 44% o consumo do restante do Brasil (ANP, 2021; IBGE, 2020a), a despeito do enorme potencial energético renovável de que dispõe.

Muito embora existam planos para a interligação de sistemas isoladas ao SIN, é preciso ter em conta que a geração local de energia pode ser altamente vantajosa desde os pontos de vista socioambiental, e de abastecimento. Isso porque, além de representar uma fonte de renda para moradores das localidades por ela atendidas, essa prática evita a supressão de mata nativa que ocorre durante a construção das linhas de transmissão e distribuição no interior da floresta provocando desmatamento (IEMA, 2018). Sob a perspectiva de suprimento, a produção de eletricidade em pequena escala reduz riscos de desabastecimento causados por interrupções no sistema coletivo de distribuição, e facilita a identificação de falhas e a implementação de ações de manutenção na rede doméstica.

Aveiro, Prainha e Porto de Moz são três dos 16 municípios que ainda são abastecidos por meio de sistemas isolados no estado do Pará e, assim como os demais, recebem energia através de moto-geradores movidos a óleo diesel instalados no local. Estes municípios são bastante carentes, têm sua economia baseada na administração pública e na agropecuária, mais da metade da população vive com menos de ½ salário mínimo por pessoa e não há saneamento básico (IBGE, 2023). Os números do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do último censo demográfico (2010) classificam Aveiro, Prainha e Porto de Moz na faixa de nível baixo para desenvolvimento humano, ocupando, respectivamente, as posições 5306º, 5444º e 5520º no ranking de IDH dos 5570 municípios brasileiros.

Cientes das dificuldades em que vivem aquelas comunidades, Miranda e Kulay (2023) propuseram uma forma alternativa aos moto-geradores movidos a óleo diesel, para produzir eletricidade em regiões isoladas. Em linhas gerais o sistema se utiliza de biogás obtido da digestão anaeróbia de resíduos agropecuários em substituição ao combustível fóssil. A partir disso, os autores aplicaram a técnica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para comparar impactos ambientais acarretados pelo uso das duas fontes de energia para diferentes condições de operação e os resultados constatarem desvantagens ambientais significativas quando o diesel serve de força-motriz para produção de eletricidade em municípios no interior do estado do Pará, a depender do cenário analisado. O presente estudo permanece nesta vertente, porém agora com o propósito de investigar impactos sobre a dimensão social, proporcionados pela produção de energia a partir de moto-geradores a diesel, e de usinas operadas com biogás. Para tanto, uma abordagem baseada em ACV com viés social foi empregada para condições semelhantes às existentes em Aveiro, Prainha e Porto de Moz. Espera-se que os achados obtidos por essa pesquisa possam subsidiar processos

de tomada-de-decisão realizados nos âmbitos da segurança energética da população amazônica, e do desenvolvimento sustentável da região. O estudo pretende também contribuir para o tema de geração de eletricidade através de fontes renováveis alternativas e menos exploradas nos meios científico e político, caso da geração de biogás na Amazônia.

5.2.BACKGROUNDS

5.2.1. ACV-S

A Avaliação Social de Ciclo de Vida (ACV-S) é uma técnica concebida para avaliar impactos sociais provocados por produtos e serviços ao longo de seus ciclos de vida; ou seja, desde a extração de recursos naturais, até a destinação final (descarte, ou término) dos mesmos (UNEP, 2020). A ACV-S sistematiza informações acerca de aspectos sociais e socioeconômicos, combinando dados qualitativos e quantitativos com o propósito de subsidiar processos de tomada-de-decisão voltados para melhoria do desempenho nesta dimensão, do objeto de análise, ou de organizações a ele relacionadas. A técnica usa de uma lógica semelhante a aplicada pela ACV ambiental, porém combinada com metodologias do campo das ciências sociais.

Enquanto a ACV ambiental avalia os impactos potenciais gerados sobre o entorno por atividades antrópicas (MOORE & KULAY 2019; MORITA et al, 2020) a ACV-S avalia efeitos sob a perspectiva das Partes Interessadas envolvidas nas cadeias de valor dos mesmos elementos da Tecnosfera (MACOMBE et al, 2013; CARMO et al, 2016). Nesse caso, tais desdobramentos são descritos por categorias de impacto social como: Trabalhadores, Comunidades locais, Atores da cadeia de valor, Consumidores, Crianças e Sociedade (HUARACHI et al, 2020). Isso significa que uma medição de desempenho social de certo produto ou serviço irá considerar indicadores relacionados aos *stakeholders* que integram seu ciclo de vida (MACOMBE et al, 2013).

Apesar dos avanços na área, a metodologia de ACV-S ainda não está plenamente desenvolvida, havendo limitações quanto a mensuração dos impactos sociais *per se*. Ainda assim, a ACV-S mostra grande potencial como técnica de suporte a gestão. Isso porque, diferentemente do que ocorre com outras metodologias usadas para avaliação social, e abordagens de Responsabilidade Social Corporativa, a ACV-S adota uma abordagem sistêmica da cadeia de valor (CARMO et al, 2016; UNEP, 2020).

A ACV-S vem se destacando por ajudar a elaborar diagnósticos robustos e completos, quando atua conjuntamente com as congêneres ambiental e econômica (HUARACHI et al, 2020). São exemplos de aplicações da ACV-S a experiência vivida por Schlör et al (2017) na busca por identificar os fatores de maior potencial de impacto social na produção de hidrogênio em três diferentes países da Europa ocidental, considerando as partes da cadeia de valor em outras localidades do globo. Seguindo em outra direção, Wang et al (2022), associaram ACV-S e ACV ambiental para avaliar impactos ocasionados por lâmpadas de LED na China, identificar os cenários mais promissores de destinação final do produto, e determinar aspectos sociais e ambientais que mais afetam seu ciclo de vida. Nesse âmbito, destacam-se também as aplicações de ACV-S a temas voltados para geração de energia renovável como aquelas relatadas por Werker et al (2019), Ren et al (2015), Takeda et al (2019), Corona et al (2017) entre outros.

Por fim, destaque-se o estudo realizado por Souza et al (2021), que utilizaram a lógica da ACV-S para propor o Índice de Desenvolvimento Humano dos Trabalhadores (IDH-T). Inspirado no IDH, esse parâmetro reúne múltiplos aspectos do desempenho social de certa atividade humana em um indicador único capaz de atuar como balizador de ações de gestão. Os autores validaram o IDH-T aplicando-o ao grupo de fornecedores de mão-de-obra que atuam em diferentes arranjos de produção de etanol praticados no Brasil. Devido às suas características e especificidades, o índice também foi selecionado para condução deste estudo.

5.2.2. IDH-T

Lançado em 1990, o IDH impôs uma quebra de paradigma na forma de pensar o desenvolvimento da humanidade ao suplementar a dimensão econômica – até então descrita por parâmetros como Produto Interno Bruto (PIB) per capita – com outros elementos essenciais a essa realidade (ASSA, 2021). Na versão mais atual (Eq. 1), este indicador é determinado pela média geométrica de índices normalizados, que descrevem as dimensões de saúde, educação e renda UNDP (2015).

$$IDH = \sqrt[3]{I_{saúde} \times I_{educação} \times I_{renda}} \quad (\text{Eq. 1})$$

O índice de saúde ($I_{saúde}$) é medido por meio da expectativa de vida ao nascer, o indicador de educação ($I_{educação}$) considera anos de escolaridade média e expectativa de anos de escolaridade, e

o índice de renda (I_{renda}) é medido através do PIB per capita. Tais indicadores são normalizados considerando-se limites máximo e mínimo de variação dos mesmos parâmetros (Tabela 5.1), a partir da aplicação das equações Eq. 2a e 2b.

$$I_{\left(\begin{smallmatrix} saúde \\ educação \end{smallmatrix}\right)} = \frac{Valor\ atual - Valor\ mínimo}{Valor\ máximo - Valor\ mínimo} \quad (\text{Eq. 2a})$$

$$I_{renda} = \frac{\log(Valor\ atual) - \log(Valor\ mínimo)}{\log(Valor\ máximo) - \log(Valor\ mínimo)} \quad (\text{Eq. 2b})$$

Tabela 5. 1. Limites máximos e mínimos dos indicadores sociais considerados pela ONU.

Dimensão	Indicador	Unidade	Min	Max
Saúde	Expectativa de vida (anos)	Anos	20	85
Educação	Expectativa de Escolaridade (anos)	Anos	0	18
	Escolaridade média (anos)	Anos	0	15
Padrão de vida	PIB per capita	US\$	100	75000

Fonte: UNDP, 2015

Souza et al (2021) propuseram o IDH-T, com dois intuitos: (i) mensurar impactos sociais originados por diferentes cenários produtivos; e, (ii) facilitar a comparação entre distintos aspectos sociais avaliados com o uso da ACV-S para determinado setor de trabalho que atua em um processo produtivo. Assim como seu congênere, o IDH-T é calculado levando-se em consideração aspectos de saúde, educação e renda; no entanto, no caso presente, os índices que mensuram cada dimensão são voltados para os trabalhadores que atuam na cadeia de produção de determinado produto ou serviço, sendo a dimensão de saúde medida através da taxa de acidentes de trabalho, a dimensão de educação medida através do tempo de escolaridade dos trabalhadores e a dimensão de renda é representada pelo salário.

A lógica de cálculo do IDH-T é idêntica à aplicada para determinar o IDH (Eq. 2) e a determinação de I_{renda} e $I_{educação}$ obedece aos mesmos limites inferior e superior que aqueles usados para o cálculo do IDH indicados na Tabela 5.1, com a diferença que o IDH-T desconsidera expectativa de escolaridade no cálculo de $I_{educação}$. Assim, o índice de escolaridade ($I_{educação}$) e o índice de renda (I_{renda}) para o IDH-T podem ser calculados de acordo com as equações Eq. 3 e Eq. 4, respectivamente.

Já a dimensão de saúde, estimada em função da taxa de acidentes de trabalho (IA), é calculada através da correlação apresentada na equação Eq. 5 obtida de Souza et al (2021) que relaciona a quantidade de acidentes ocorridos em um determinado país com o índice saúde daquele país de acordo com a ONU. Tal correlação é apresentada na Figura F.1 no Apêndice F.

$$I_{\text{educação}} = \frac{\text{Escolaridade média}}{15} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$I_{\text{renda}} = \frac{\log(\text{salário anual médio}) - \log(75000)}{\log(75000) - \log(100)} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$I_{\text{saúde}} = 0,9724 - 2,47E^{-5}IA \quad (\text{Eq. 5})$$

5.3.MÉTODO

O método de trabalho estabelecido para atender os objetivos a que esta investigação se propõe, foi estruturado de acordo com as seguintes etapas: (i) Definição dos cenários de análise; (ii) Determinação do quadro de funcionários associado a cada empreendimento; (iii) Estimativa dos índices normalizados de desempenho social e cálculo do IDH-T; e, (iv) Análise dos resultados obtidos e formulação de considerações.

Devido ao fato de a prospecção de cenários da cadeia de produção de energia estar associada a uma alta incerteza, principalmente para a rota de geração a biogás, as características dos cenários referentes ao número e classificação de trabalhadores foram avaliadas em duas variações cada a fim contornar tal limitação: uma otimista (mais tecnológica e especializada) e uma pessimista (uma menos tecnológica e especializada). Esses dois cenários podem ser observados de diferentes maneiras ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

5.3.1. Definição de cenários de análise

A premissa original estabelecida para definição dos cenários de análise consistiu em considerar apenas aqueles que obtiveram melhores resultados de desempenho ambiental a partir da avaliação realizada por Miranda e Kulay (2023) para cada localidade avaliada, bem como seus respectivos cenários de geração a diesel (cenários base). A Tabela 5.2 exibe informações acerca do consumo de ativos, e da produção de eletricidade para cada cenário de geração elétrica, sendo simbolizados por Av, Pr, ou PM quando localizados em Aveiro, Prainha ou Porto de Moz, respectivamente e por B ou D, quando a fonte de combustível é biogás ou diesel, respectivamente.

Tabela 5. 2. Consumos e produções diárias associadas a cada cenário de análise.

	Unidades	Av-B	Pr-B	PM-B	Av-D	Pr-D	PM-D
Consumo de esterco	(t/dia)	57,6	193,5	390	0,00	0,00	0,00
Consumo de palha de milho	(t/dia)	5,60	18,7	37,6	0,00	0,00	0,00
Consumo de diesel	(m ³ /dia)	0,00	0,00	0,00	2,60	8,00	15,9
Produção de energia	(kWh/dia)	10.895	36.616	73.449	9.553	32.110	64.723

5.3.2. Quantificação do quadro funcional de cada empreendimento

Uma das componentes fundamentais para estimativa do IDH-T consiste do número de trabalhadores envolvidos na geração de energia elétrica em cada cenário analisado. No entanto, a determinação dessa quantidade, assim como a classificação desses profissionais nos respectivos cargos e funções, não é tarefa simples, devido a especificidade de cada cadeia de produção (i.e., tecnologia empregada, localização geográfica, escala), e a escassez de informações a respeito dos recursos humanos que atuam em empreendimentos industriais em operação. Para contornar essas barreiras foram aplicadas metodologias específicas para cada situação, mas cujas validades são correspondentes. Enquanto para os cenários de geração de eletricidade via biogás aqueles parâmetros foram estabelecidos por prognósticos empíricos baseados em dados de literatura, nos cenários envolvendo geração a diesel, tais fatores foram obtidos a partir de entrevistas com trabalhadores que atuam em plantas operantes.

5.3.2.1. Número de trabalhadores envolvidos na geração elétrica a diesel

Cada um dos municípios abordadas pelo estudo possui atualmente uma usina termelétrica movida a diesel para atender a demanda local de eletricidade. Essa situação permitiu que fossem conduzidas entrevistas por meio telefônico com um funcionário de cada unidade para obtenção de informações acerca de suas características operacionais, e do quadro funcional existente. O roteiro utilizado durante a coleta desses depoimentos está descrito no Apêndice C. Para cargos de direção cujas atividades se dividem entre o atendimento de diferentes sistemas isolados, o número de trabalhadores foi distribuído a partir da razão entre a potência gerada pela usina local, e a potência total média gerada pelos 16 sistemas isolados do estado do Pará.

A produção de energia a diesel gera empregos em outras cadeias de produção – como o processamento do diesel – que também devem ser incluídas no estudo. Para este caso em particular, admitiu-se que todo o combustível consumido pelas termelétricas da Amazônia seria de procedência nacional. Essa simplificação reduziu o universo de trabalhadores empregados na indústria petroquímica àqueles que efetivamente atuam no Brasil. O valor correspondente a esse total para o ano de 2020, foi então coletado junto ao banco de dado do Ministério do Trabalho e Emprego para a categoria de ‘Fabricação de produtos do refino de petróleo’ (MTE, 2022a). A partir disso, assumiu-se que a parcela desse contingente que, em tese, estaria dedicada apenas ao processamento de diesel seria equivalente à parcela da receita gerada pela comercialização do diesel em relação a todos os derivados de petróleo (IBGE, 2020b). Assim, com a quantidade total de diesel produzido no Brasil em 2020 e dos trabalhadores envolvidos nessa produção, obteve-se o número de pessoas envolvidas na produção de uma unidade de volume de óleo diesel e, conseqüentemente, os trabalhadores desse setor que seriam necessários para o fornecimento de diesel para as gerações elétricas em Aveiro, Prainha e Porto de Moz por meio de seus respectivos consumos.

5.3.2.2. Número de trabalhadores envolvidos na geração elétrica a biogás

A estimativa do número de trabalhadores da usina movida a biogás partiu de diferentes métodos e condições. Um relatório publicado pela Organização Internacional do Trabalho (do inglês, ILO) sobre a economia do biogás na Índia (HARSDORFF, 2014) exemplifica que uma

planta de produção de biogás, que gera 1,2 MW a partir de esterco bovino nas condições locais, gera 70 postos de trabalho, isto é, 58 trabalhadores/MW. Uma consultoria internacional realizou um estudo para estimativa de empregos gerados no setor de bioenergia do Reino Unido em 2020 (NNFCC, 2012) e apontou que haveriam 4,24 trabalhadores (*full-time equivalent*) para cada MW de energia produzida. Uma técnica também bastante utilizada em análise de custos para a estimativa do número de operadores em um processo é a equação Eq. 6 (ALKHAYAT e GERRARD, 1984; TURTON et al, 2012) obtida empiricamente a partir de informações de cinco companhias químicas, na qual o número de trabalhadores (N) é função do número de operações envolvendo sólidos (S) e do número de operações não envolvendo sólidos (NS). Os valores obtidos por esse método variaram entre 28 e 51 operadores para o modelo de planta de biogás descrito por Miranda e Kulay (2023) a depender do número de operações com sólidos considerado.

$$N = (6,29 + 31,7S^2 + 0,23NS)^{0,5} \quad (\text{Eq. 6})$$

A elevada variabilidade observada durante as estimativas do número de trabalhadores para plantas termelétricas operadas com biogás, aliada a falta de detalhamento quanto as funções exercitadas por esses profissionais, fez com que uma lógica diferente das descritas anteriormente fosse utilizada para efeito desta contabilização. Em linhas gerais, esta abordagem consistiu em classificar as atividades praticadas na usina em categorias genéricas, tais como: Obtenção de substrato, Transporte, Manutenção, além de um conjunto composto por Operação, Administração, Limpeza e Vigilância –, para depois determinar a quantidade de trabalhadores lotados em cada uma delas a partir de informações disponíveis para essa contabilização. O *modus operandi* empregado para cada categoria de atividades aparece descrito a seguir.

Obtenção de substrato

As atividades de obtenção de substrato tiveram os números de trabalhadores estimados a partir das taxas de alimentação de esterco e palha para cada cenário, e da capacidade de processamento (kg/(trabalhador × dia)) desses operários. Esta última foi condicionada ao tipo de tecnologia empregada para acúmulo de esterco nas fazendas, sendo do tipo *Alley scraper*, para a

situação otimista, e do gênero *Skid loader*, para o caso pessimista. Os valores de produtividade de cada tecnologia foram obtidos de Sanford (2016) e estão disponíveis no Apêndice D.

Transporte

A quantidade de trabalhadores da atividade de Transporte do substrato entre as fazendas e a usina foi estabelecida considerando-se a quantidade de caminhões (16 m³ de capacidade de carga) necessária para abastecer a massa de material requerido para a operação diária de planta de geração elétrica. Os valores que descrevem as distâncias percorridas, massas de cada substrato, e modais de transporte utilizados em cada cenários de análise estão apresentadas no Apêndice D.

Para a estimativa do número de trabalhadores no transporte foram consideradas as seguintes informações: a velocidade média do transporte rodoviário em rodovias da Amazônia como sendo de 30 km/h (otimista) ou 40 km/h (pessimista) (PEGURIER e SÁ, 2013; EXÉRCITO BRASILEIRO, 2021); cada caminhão possui apenas um condutor; o tempo dedicado ao deslocamento é de 3h diárias; para Porto de Moz 80% do trajeto da palha importada do município vizinho é feita pelo modal fluvial e, nesse caso, a capacidade da balsa é de 1000 t (otimista) ou 300 t (pessimista) e a velocidade, neste caso, é de 22 km/h (otimista) ou 18 km/h (pessimista).

Manutenção

A equipe de manutenção foi definida de acordo com a quantidade de equipamentos principais, e seus respectivos tempos e frequências de manutenção. Foram considerados para efeito dessas estimativas: motores elétricos, sistemas hidráulicos, compressores, trocadores de calor e moto-geradores. Os tempos e frequências de manutenção foram estimados a partir de valores disponíveis nos catálogos técnicos desses equipamentos disponibilizados pelos fabricantes e apresentados no Apêndice D. Para efeito de simplificação, as equipes de manutenção não variaram de localidade para localidade assumindo-se que o tamanho do equipamento não tem influência sobre o número de manutentores.

Operação, administração, limpeza e vigilância

A estimativa de pessoas dedicadas a funções de operação, administração e limpeza das usinas foi realizada através da especificação de cada atividade envolvida, e a quantidade de horas dedicadas diariamente para a realização destas atividades de acordo com a função. Os tempos dedicados à realização de cada atividade estão disponíveis no Apêndice D. Para efeito de simplificação, as equipes de operação e administrativo nas usinas não variaram de localidade para localidade assumindo-se que as atividades a serem desempenhadas independem da escala da usina. A quantidade de pessoas envolvidas em atividades de vigilância para as usinas a biogás foi considerada a mesma quantidade empregada nas usinas a diesel obtida através de entrevistas.

5.3.3. Obtenção de dados e cálculo do IDH-T

Para obter dados que exprimissem de maneira adequada o IDH-T dos trabalhadores envolvidos nos processos de geração de energia em municípios isolados da Amazônia, foi necessário caracterizar cada funcionário com relação ao grau de escolaridade, renda, e índice de acidente relacionado a atividade por ele desempenhada. Para tanto, foram realizadas consultas à Bases de Dados oficiais publicadas pelo Governo do Brasil, e coletadas informações sobre essas dimensões, que estivessem disponíveis na literatura científica.

5.3.3.1. Estimativa de índices de escolaridade e renda

Definidas as atividades a serem desempenhadas em cada operação de produção de energia, estas foram associadas a categorias existentes na Classificação Brasileira de Ocupações (CBO) (MTE, 2023). Esse procedimento permitiu obter valores médios de escolaridade e renda dos trabalhadores, a partir da frequência de registros de vínculos em cada ocupação da CBO no país para o ano de 2020. Tais informações foram extraídas da Base de Dados da Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) (MTE, 2022b), sendo uma média ponderada da renda, e do grau de escolaridade dos trabalhadores calculada para cada cenário.

5.3.3.2. Estimativa do índice de acidentes

Uma dimensão importante para a medida do IDH-T é a taxa de acidentes medida em número de acidentes a cada 100 mil trabalhadores. Essa estimativa está disponível no banco de dados do Ministério do Trabalho (MTE, 2022b), para o qual acidente de trabalho “é o que ocorre pelo exercício do trabalho a serviço da empresa, ou de empregador doméstico, ou pelo exercício do trabalho do segurado especial, provocando lesão corporal ou perturbação funcional, de caráter temporário ou permanente” e pode causar desde um simples afastamento, a perda ou a redução da capacidade para o trabalho, até mesmo a morte do segurado.

Entretanto, embora os dados de acidentes sejam atualizados, a subnotificação é um problema que pode mascarar os resultados. A fim de minimizar tais efeitos, os dados foram corrigidos por um índice aproximado de subnotificação, cujo valor determinado a partir da literatura varia entre 20% (OBSERVATÓRIO DE SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO, 2021) e 80% (CORDEIRO, 2005). No presente trabalho, para efeito de comparação, o índice de subnotificação aplicado foi de 71% estimado por Barata (2000), o mesmo utilizado por Souza et al (2021) para medida do IDH-T. A relação da taxa de acidentes com a componente matemática do IDH-T referente a saúde ($I_{saúde}$) também foi estimada de acordo com o ajuste realizado por Souza et al (2021) com os dados de Hämäläinen et al. (2006), a qual é expressa pela equação Eq. 5.

5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das estimativas dos possíveis impactos sociais do fornecimento de energia para três localidades da Amazônia brasileira são apresentados a seguir. Primeiramente são apresentados e discutidos os resultados da quantificação dos trabalhadores empregados em cada uma das atividades vinculadas ao abastecimento energético das localidades do estudo, depois é realizada uma avaliação dos indicadores sociais por meio da obtenção do indicador IDH-T para os cenários de fornecimento de energia a biogás em comparação aos cenários de fornecimento a diesel de forma a apontar as alternativas mais sustentáveis.

5.4.1. Número de trabalhadores estimado

As medidas do indicador IDH-T foram realizadas sobre os trabalhadores envolvidos diretamente na cadeia de produção da energia elétrica para os municípios de Aveiro, Prainha e Porto de Moz. Portanto, o dimensionamento e caracterização desses grupos foi parte fundamental para obtenção de resultados de impacto socioambientais. Devido às diferenças metodológicas para a quantificação dos trabalhadores vinculados à geração a diesel e a biogás, a discussão dos resultados é realizada separadamente.

5.4.1.1. Número de trabalhadores nos cenários de geração a diesel

As informações a respeito de características de operação das usinas de geração elétrica a diesel são apresentadas na Tabela 5.3 e o número de trabalhadores que atuam nessas unidades são apresentadas nas Tabelas 5.4. Assim como já fora reportado, os valores de ambas as tabelas foram de obtidos por entrevistas com funcionários das usinas.

Tabela 5. 3. Informações técnicas da operação de usinas termelétricas a diesel nas localidades do estudo.

	Aveiro	Prainha	Porto de Moz
Capacidade (kW)	398	1338	2697
Número de moto-geradores a diesel	4	9	16
Consumo de diesel (L/dia)	2640	8000	15900
Período de recebimento de diesel (dias)	25	15	4
Consumo específico de diesel (L/kW)	0,276	0,249	0,246

Tabela 5. 4. Distribuição dos trabalhadores das usinas elétricas a diesel de acordo com a função e localidade.

Cargos	Aveiro	Prainha	Porto de Moz
Operador	9	12	9
Técnico	0	1	2
Limpeza	0	1	2
Vigilância	0	4	4
Coordenação	0,013	0,045	0,092
Gerência	0,013	0,045	0,092
Fabricação de produtos do refino de petróleo	0,23	0,68	1,36
Transporte	0,01	0,04	0,08
Total	9,31	18,85	18,61

Os valores fracionados atribuídos à quantidade de trabalhadores em cargos de coordenação e gerência (Tabela 5.4) se devem ao fato dessas funções não estarem dedicadas exclusivamente a uma usina, mas sim, a todas as unidades em operação para suprimento de sistemas isolados do estado do Pará. Todos os relatos deram conta de que a usina contava com um coordenador e um gerente, mas cujas intervenções se davam de forma remota. Diante disso, a dedicação desses trabalhadores aos empreendimentos em análise foi estimada proporcionalmente a quantidade de energia que cada unidade produziu em 2020 frente ao total gerado no estado do Pará. Para Aveiro, Prainha e Porto de Moz essas parcelas corresponderam, respectivamente, a 1,3%, 4,4% e 9,2%. No caso dos trabalhadores do transporte, o número fracionado da Tabela 5.4 decorre do fato de o abastecimento de combustível nas usinas ocorrer apenas uma vez a cada período informado na Tabela 5.3, bem como ao fato de os volumes de combustível transportados pelas embarcações consideradas no estudo serem maiores que o consumo das unidades termelétricas.

São notórias as diferenças nos quadros funcionais entre as localidades do estudo. Em Aveiro, a menor das três localidades, os operadores da usina elétrica também respondem por alguns serviços técnicos, e pela limpeza do local de trabalho. Além disso, não há serviço de vigilância. Em Prainha, há 12 trabalhadores dedicados à operação da planta, maior contingente dentre as usinas avaliadas, muito embora este sistema não atinja o volume mais elevado de geração de energia entre as três localidades. Ainda que a usina de Porto de Moz se destaque das demais pela capacidade produtiva, seu número de operadores é igual ao do sistema instalado em Aveiro. Por outro lado, suas tarefas estão melhor distribuídas entre outros profissionais especializados, havendo espaço para dois cargos técnicos, além de agentes de limpeza e vigilância.

Dado que as informações referentes a estimativa do número de trabalhadores das usinas a diesel decorreram de entrevistas com os próprios trabalhadores destas usinas, não foram elaborados cenários otimista ou pessimista com diferentes números de trabalhadores, devido a menor incerteza associada ao método adotado.

5.4.1.2. Cenários de geração a biogás

As diferenças de estimativa entre o número de trabalhadores envolvidos na geração de energia por biogás, para os cenários otimista e pessimista ocorre em função do número de postos de trabalho destinados a Obtenção e Transporte de substrato. A Tabela 5.5 lista as atividades a

serem desempenhadas para operação do processo, classifica atividades em setores, e indica a quantidade de trabalhadores dedicados a cada qual dessas ações, para os respectivos cenários e variações.

Tabela 5. 5. Número de trabalhadores atuando em cada setor/atividade relacionada a geração de energia via queima de biogás por município, para as situações pessimista e otimista de tecnologia de operação.

Setor	Atividades	Av-B		Pr-B		PM-B	
		Pessimista	Otimista	Pessimista	Otimista	Pessimista	Otimista
Substrato	Coleta de esterco nas fazendas	3	0	10	0	19	0
Substrato	Coleta de palha nas fazendas	2	2	4	5	9	9
Alimentação	Descarregamento e armazenagem	3	3	3	3	3	3
Alimentação	Carregamento do moinho	3	3	3	3	3	3
Alimentação	Carregamento do mixer	1	1	1	1	1	1
Alimentação	Operação do hidrociclone	1	1	1	1	1	1
Equipamento	Operação do desumidificafor	3	3	3	3	3	3
Equipamento	Operação do gerador	3	3	3	3	3	3
Digestato	Operação do screw-press	5	5	5	5	5	5
Digestato	Operação do secador de tambor	5	5	5	5	5	5
Digestato	Acondicionamento do digestato	6	6	6	6	6	6
Adm	Financeiro/suprimentos	1	1	1	1	1	1
Adm	Recursos humanos	1	1	1	1	1	1
Adm	SSMA	1	1	1	1	1	1
Adm	Coordenação	1	1	1	1	1	1
Adm	Direção	1	1	1	1	1	1
Transporte	Transporte esterco	0,20	0,15	1,10	0,83	4,76	3,57
Transporte	Transporte palha	0,40	0,30	1,16	0,87	0,44	0,11
Manutenção	Manutenção	5	5	5	5	5	5
Serviços gerais	Limpeza	3	3	3	3	3	3
Vigilância	Segurança	4	4	4	4	4	4
Total		52,60	49,45	63,26	53,70	80,20	59,68

Legenda: Av-B: geração elétrica por biogás em Aveiro; Pr-B: geração elétrica por biogás em Prainha; PM-B: geração elétrica por biogás em Porto de Moz.

A oferta de energia está diretamente relacionada a produção de biogás e, conseqüentemente, a demanda por substrato. Por conta disso, é natural que Porto de Moz faça uso de mais mão-de-obra do que Prainha e Aveiro para obtenção e transporte desse insumo. No entanto, para as situações otimistas, em que a coleta de esterco ocorre de forma mecanizada, não se faz necessário um número significativo de trabalhadores para tais atividades. A quantidade total de trabalhadores dimensionada para as usinas a biogás mostra-se relativamente próxima àquela estimada por Harsdorff (2014) para a planta alocada na Índia (70 trabalhadores empregados em usina com capacidade de 1,20 MW. Da mesma forma, o valor não difere muito do resultado obtido a partir da

aplicação da equação de Alkhayat e Gerrard (1984), de 51 trabalhadores, se consideradas duas operações envolvendo materiais sólidos em uma usina. Assim sendo, é razoável afirmar as estimativas apresentadas na Tabela 5.5 não incorrem em grandes erros de projeção, sendo por isso consideradas aceitáveis.

5.4.2. Cálculo do IDH-T

Concluídas as determinações do número de trabalhadores dedicados a cada atividade laboral relacionada à oferta de energia, aquelas ações foram então associadas a funções descritas segundo a Classificação Brasileira de Ocupações 2002 (CBO) (MTE, 2023), com o intuito de fornecer dados sobre renda média, e média de escolaridade desses colaboradores. Em alguns casos, porém, mais de uma ocupação descrita na CBO estaria apta a desempenhar certa atividade da cadeia produtiva de energia elétrica; sendo assim foram realizadas projeções nas perspectivas otimista – e que as ocupações com maiores índices de escolaridade e renda, foram selecionadas como forma de caracterizar as atividades avaliadas –, e pessimista – para a qual ocupações com menores grau escolaridade e remuneração serviram para especificar essas dimensões para cada trabalhador.

As Tabelas 5.6 e 5.7 trazem a relação das atividades consideradas para a operação das usinas operadas com biogás e diesel, as ocupações da CBO nas variações otimistas e pessimistas, e os indicadores de escolaridade e renda correspondentes.

As taxas de acidentes estão distribuídas nos Bancos de Dados do MTE (MTE, 2022) por setores da economia, motivando um relacionamento imediato da geração elétrica com tais setores. Como o Brasil ainda não possui uma indústria consolidada de produção de energia a biogás, foi necessário associar as atividades de operação dessas usinas a um setor semelhante, cujos dados estivessem disponíveis no mesmo repositório. Assim, dois setores da economia foram selecionados para representar esse conjunto de atividades em termos de taxas de acidente: (i) Operações de estações de tratamento de esgoto (ETE), por compartilhar de algumas etapas comuns à produção de biogás, como digestão anaeróbia e tratamento de lodo – digestato; e (ii) Fabricação de etanol anidro desde cana-de-açúcar, também em função da existência de etapas comuns com a usina, de pré-tratamento de biomassa, e fermentação. Assim, o setor com menores taxas de acidentes, a operação de ETE, passou a representar a situação otimista, enquanto a fabricação de etanol, de maior taxa de eventos com dano, representou a projeção pessimista.

Além disso é importante destacar que, embora seja possível obter dados específicos dos estados brasileiros nas bases de dados consultadas, os valores de renda, escolaridade e taxa de acidentes utilizados para a realização do estudo foram nacionais, a fim de minimizar efeitos de amostragem insuficiente e evitar taxas maiores de subnotificação. Os resultados da aplicação dessas premissas e considerações aparecem registrados na Tabela 5.6, para geração elétrica via biogás, e Tabela 5.7, para eletrificação por queima de diesel.

Tabela 5. 6. Caracterização das atividades ligadas à geração de energia a biogás quanto a escolaridade, renda e taxa de acidentes.

Atividades de geração elétrica a biogás	Projeção otimista					Projeção pessimista				
	Setor econômico	Ocupação segundo a CBO	Escolaridade média (anos)	Remuneração média (R\$/m)	Taxa de acidentes (10 ⁻⁵)	Setor econômico	Ocupação	Escolaridade média (anos)	Renda média (R\$/mês)	Taxa de acidentes (10 ⁻⁵)
Coleta de esterco	Criação de bovinos	Trabalhador da pecuária	7,94	1.026,74	3521	Criação de bovinos	Trabalhador da pecuária	7,94	1026,74	3521
Coleta de palha	Beneficiamento de milho	Produtor de milho e sorgo	9,79	1.172,18	3193	Beneficiamento de milho	Produtor de milho e sorgo	9,30	1350,99	3193
Descarregamento e armazenagem	Operação de ETE	Operador de ETE	10,96	2.511,10	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Carregador (armazém)	8,83	1028,74	8624
Carregamento do moinho	Operação de ETE	Operador de ETE	10,96	2.511,10	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Carregador (armazém)	8,83	1028,74	8624
Carregamento do mexer	Operação de ETE	Operador de ETE	10,96	2.511,10	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Carregador (armazém)	8,83	1028,74	8624
Operação do hidrociclone	Operação de ETE	Técnico de utilidade	12,33	3.814,17	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Operador de filtro-prensa	9,99	1703,82	8624
Operação do desumidificador	Operação de ETE	Técnico de utilidade	12,33	3.814,17	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Operador de filtro-prensa	9,99	1703,82	8624
Operação do gerador	Operação de ETE	Técnico de utilidade	12,33	3.814,17	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Operador de filtro-prensa	9,99	1703,82	8624
Operação do screw-press	Operação de ETE	Técnico de utilidade	12,33	3.814,17	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Operador de filtro-prensa	9,99	1703,82	8624
Operação do secador de tambor	Operação de ETE	Técnico de utilidade	12,33	3.814,17	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Operador de filtro-prensa	9,99	1703,82	8624

Acondicionamento do digestato	Operação de ETE	Técnico de utilidade	12,33	3.814,17	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Operador de filtro-prensa	9,99	1703,82	8624
Financeiro	Operação de ETE	Técnico de contabilidade	14,27	3.434,20	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Auxiliar de contabilidade	13,56	1793,92	8624
Recursos humanos (RH)	Operação de ETE	Analista de RH	15,14	3.667,10	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Técnico em administração	13,87	3417,83	8624
Saúde, segurança e meio ambiente	Operação de ETE	Engenheiro de segurança do trabalho	16,10	7.636,82	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Técnico em segurança no trabalho	12,98	3132,04	8624
Coordenação	Operação de ETE	Supervisor de operação elétrica	12,36	4.988,25	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Supervisor de operação elétrica	12,36	4988,25	8624
Direção	Operação de ETE	Diretor geral de empresa	14,79	12.855,36	493	Fabricação de álcool de cana de açúcar	Diretor de produção	13,97	11165,27	8624
Transporte esterco	Transporte rodoviário de cargas em geral	Motorista de caminhão	9,99	1.782,27	39848	Transporte rodoviário de cargas em geral	Caminhoneiro autônomo	9,94	1588,99	39848
Transporte palha	Transporte rodoviário de cargas em geral	Motorista de caminhão	9,99	1.782,27	39848	Transporte rodoviário de cargas em geral	Caminhoneiro autônomo	9,94	1588,99	39848
Manutenção	Operação de ETE	Eletrotécnico	12,85	5.223,26	493	Operação de ETE	Técnico mecânico	11,76	2772,7	493
Limpeza	Serviços de limpeza e manutenção	Trabalhador de serviços de limpeza	9,42	1.029,42	3503	Serviços de limpeza e manutenção	Empregado doméstico	9,91	543,17	3503
Segurança	Serviços de vigilância	Vigilante	11,13	1.630,10	3503	Serviços de vigilância	Vigilante	11,13	1630,1	3503

Tabela 5. 7. Caracterização das atividades ligadas à geração de energia a biogás quanto a escolaridade, renda e taxa de acidentes.

Atividades geração a diesel	Projeção otimista					Projeção pessimista				
	Setor econômico	Ocupação segundo a CBO	Escolaridade média (anos)	Renda média (R\$/m)	Taxa de acidentes corrigidas (10 ⁻⁵)	Setor econômico	Ocupação	Escolaridade média (anos)	Renda média (R\$/mês)	Taxa de acidentes (10 ⁻⁵)
Operadores	Produção de energia elétrica de origem térmica	Operador de utilidade	11,88	3.250,01	1445	Produção de energia elétrica de origem térmica	Operador de filtro-prensa	9,99	1.703,82	1445
Técnicos	Produção de energia elétrica de origem térmica	Eletrotécnico	12,85	5.223,26	1445	Produção de energia elétrica de origem térmica	Técnico mecânico	11,76	2.772,70	1445
Limpeza	Serviços de limpeza e manutenção	Trabalhador de serviços de limpeza	9,42	1.029,42	3503	Serviços de limpeza e manutenção	Empregado domestico	9,91	543,17	3503
Vigilância	Serviços de vigilância	Vigilante	11,13	1.630,10	3503	Serviços de vigilância	Vigilante	11,13	1.630,10	3503
Coordenador de operações	Produção de energia elétrica de origem térmica	Supervisor de operação elétrica	12,36	4.988,25	1445	Produção de energia elétrica de origem térmica (diesel)	Supervisor de operação elétrica	12,36	4.988,25	1445
Gerente	Produção de energia elétrica de origem térmica	Diretor geral de empresa e organizações	14,79	12.855,36	1445	Produção de energia elétrica de origem térmica	Diretor de produção	13,97	11.165,27	1445
Fabricação de produtos do refino de petróleo	Fabricação de produtos do refino de petróleo	Operador de exploração de petróleo	13,08	14.058,94	614	Fabricação de produtos do refino de petróleo	Operador de produção petroquímica	11,37	2.181,00	614
Transporte	Comércio de combustíveis de petróleo	Operador de transporte multimodal	12,67	3.415,26	772	Transporte rodoviário de cargas em geral	Piloto fluvial	9,01	3.226,36	39848

Após associar os contingentes de trabalhadores (Tabelas 5.4 e 5.5), com as caracterizações de suas ocupações, (Tabelas 5.6 e 5.7) para as gerações de eletricidade por queima de biogás e diesel, foi então possível calcular os valores médios de escolaridade, renda nominal, e taxa de acidentes para cada cenário, tendo em conta situações otimistas e pessimistas. Os resultados são apresentados no Apêndice E e foram aplicados nas equações Eq. 3, Eq.4 e Eq. 5 para a obtenção dos índices de educação ($I_{\text{educação}}$), renda (I_{renda}) e saúde ($I_{\text{saúde}}$). A partir disso, chegou-se ao IDH-T para cada cenário aplicando esses índices à equação Eq. 1 (Tabela 5.8).

Tabela 5. 8. Valores dos índices de saúde, educação e renda e IDH-T dos cenários avaliados.

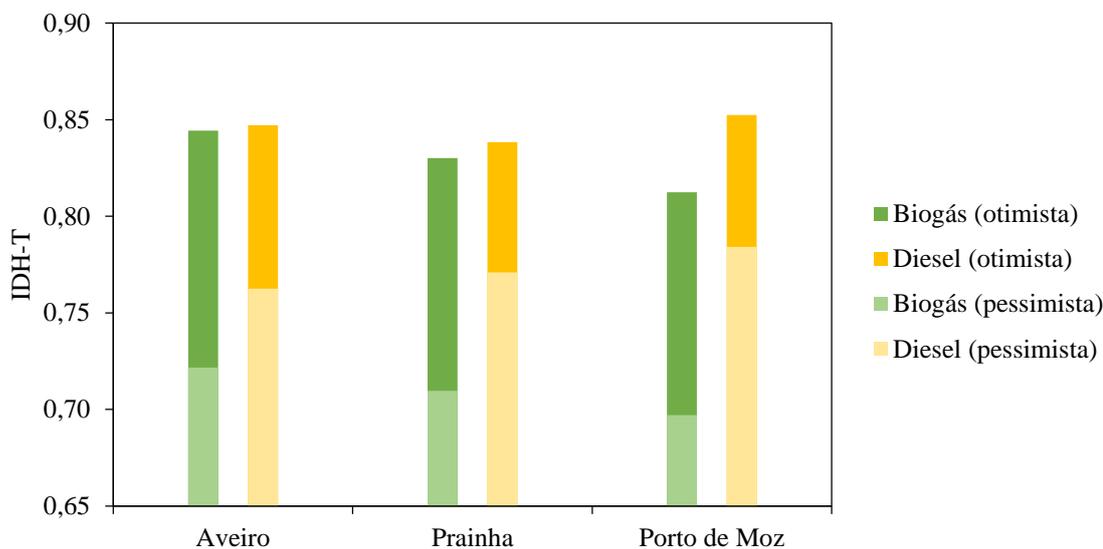
		Av-B	Pr-B	PM-B	Av-D	Pr-D	PM-D
$I_{\text{saúde}}$	Otimista	0,9382	0,9136	0,8816	0,9375	0,9272	0,9265
	Pessimista	0,7798	0,7742	0,7653	0,9375	0,9272	0,9265
$I_{\text{educação}}$	Otimista	0,8009	0,7895	0,7762	0,8094	0,8015	0,8213
	Pessimista	0,6840	0,6643	0,6463	0,6799	0,7082	0,7343
I_{renda}	Otimista	0,8009	0,7933	0,7840	0,8025	0,7938	0,8139
	Pessimista	0,7050	0,6950	0,6847	0,6986	0,6993	0,7085
IDH-W	Otimista	0,8443	0,8302	0,8125	0,8476	0,8387	0,8524
	Pessimista	0,7218	0,7097	0,6971	0,7636	0,7715	0,7841

A fim de facilitar a comparação entre cenários para diferentes situações, os valores de IDH-T são apresentados na Figura 5.1. Esse registro mostra que não há diferenças significativas em termos de impacto social para os trabalhadores, entre as gerações de energia a biogás e a diesel. As variação de IDH-T em torno de 1% entre os cenários Av-B e Av-D, e Pr-B e Pr-D levam a concluir que para empreendimentos localizados em Aveiro e Prainha que operam em situação otimista, o impacto social sobre o trabalhador é bastante semelhante a despeito de a energia advir de fonte fóssil ou renovável. Essa variação se eleva a cerca de 5%, quando comparados os cenários PM-B e PM-D.

Por outro lado, ao serem comparadas as projeções pessimistas dos cenários de eletrificação a biogás e a diesel, as diferenças para Aveiro, Prainha e Porto de Moz passam a ser, respectivamente, de 5.0%, 8.0% e 11%, com vantagem para a geração por diesel. Nota-se também que as variações de IDH-T entre o sistema acionado pelo ativo fóssil e o de origem renovável são sempre mais pronunciadas para o município de Porto de Moz. Esse fenômeno se justifica em virtude daquela usina ter porte maior do que os de suas congêneres e, assim, demandar quantidades mais expressivas de insumos para operar. Se por um lado o refino de petróleo para produção de diesel é realizado por profissionais com elevados níveis de

escolarização e remuneração, e em ambiente potencialmente seguro, por outro, os insumos essenciais à produção de biogás são os rejeitos revalorizados de processamentos agrícolas, que historicamente empregam trabalhadores com índices sociais mais baixos. Assim, à medida que são consumidos maiores volumes de combustível fóssil pelos moto-geradores, mais profissionais da cadeia produtiva do petróleo se engajam ao ciclo de vida social da geração de energia elétrica, elevando o indicador IDH-T dessa modalidade. No entanto, o efeito sobre o indicador será antagônico caso seja a geração de energia elétrica a partir de biogás que requeira mais substrato exatamente por conta dos baixos salários, níveis de escolaridade e segurança a que os trabalhadores rurais são submetidos (ou apresentam), especialmente em municípios amazônicos.

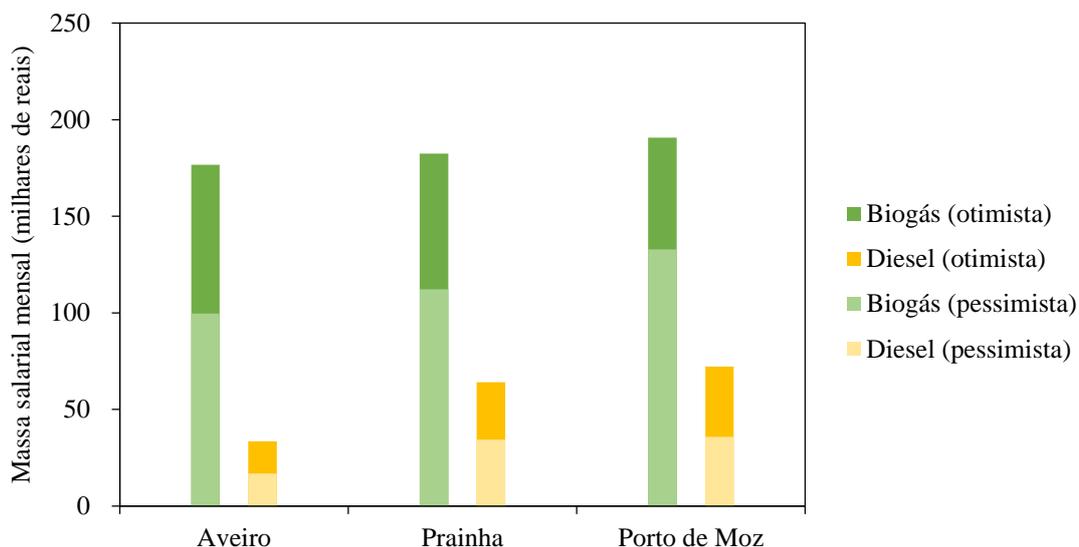
Figura 5. 1 - Índice de Desenvolvimento Humano do Trabalhador por localidade e por fonte de energia.



Entretanto, é importante destacar que o consumo de combustíveis fósseis nas localidades amazônicas não tem potencial para a melhoria de indicadores sociais locais, pelo menos da perspectiva do trabalho, uma vez que atividades de extração, refino e logística de derivados de petróleo são realizadas muito distantes dos locais de consumo. Sendo assim, embora a logística de esterco e palha para as usinas de geração a biogás envolva trabalhadores menos favorecidos socialmente, a geração de energia a biogás apresenta um potencial de mudança social consideravelmente maior. Duas evidências que conferem vantagens sociais importantes ao uso do biogás como fonte de eletricidade são a massa salarial, ou seja, montante mensal de renda gerada pelo trabalhador, e a criação de postos de trabalho proporcionada pela operação da usina.

A massa salarial da operação de uma usina a biogás, apresentada na Figura 5.2, representa entre 2 e 6 vezes a massa salarial da operação de uma usina termelétrica a diesel e a geração de empregos pode ser até 5,5 vezes maior para a geração a biogás (Tabelas 5.4 e 5.5). Se, por um lado, isso representa um problema para os custos de operação, por outro lado, os ganhos sociais podem ser surpreendentes como aponta Gonçalves et al (2020) sobre geração de empregos e renda em outros setores da economia e Sotomayor (2021) sobre a diminuição das desigualdades. Além disso, corroborando o entendimento de Murillo-Alvarado & Ponce-Ortega (2022) ao analisar outras localidades da América Latina com níveis de desenvolvimento semelhantes aos de Aveiro, Prainha e Porto de Moz, espera-se que a implantação de uma usina movida a biogás possa elevar gradualmente o IDH da região.

Figura 5. 2 - Massa salarial mensal gerada pelos cenários do estudo.



Por fim, como apontam Miranda e Kulay (2023), a adoção de sistemas de fornecimento de energia elétrica derivados da queima de biogás traz como vantagem adicional a redução de impactos nas formas de Potencial de Aquecimento Global, Ecotoxicidade Aquática e Demanda de Energia Primária. Assim, é coerente afirmar que a revalorização de rejeitos de processos agropecuários para geração de eletricidade com intuito de suprir demandas de comunidades isoladas da Amazônia traz benefícios ambientais, e não resulta em significativas desvantagens sociais, se comparada a alternativa vigente que se apoia em fontes fósseis para atender a essas necessidades.

5.5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Avaliação prospectiva de impactos sociais decorrentes da geração de eletricidade para comunidades isoladas da Amazônia brasileira mostrou que os sistemas operados com biogás não apresentam desvantagens significativas de desempenho em relação aos arranjos que fazem uso de óleo diesel.

As disparidades entre valores de IDH-T para os cenários renováveis e não-renováveis foi inferior a 10%, ainda que se observasse uma leve supremacia dos sistemas a diesel, para as localidades de Aveiro e Prainha, independentemente de a projeção ser realizada para situações otimista ou pessimista. A exceção a este comportamento ficou por conta da eletrificação de Porto de Moz, para o qual os ganhos sociais dos cenários envolvendo diesel foram francamente superiores aos apresentados pelos dos congêneres que operam com biogás. No entanto, tal supremacia não resultará em avanços sociais para a localidade, já que a elevação do IDH-T dos arranjos contendo diesel se origina da cadeia de processamento deste insumo, que se localiza a grande distância das comunidades isoladas. Ao contrário disso, dispor de um sistema de geração local de energia a partir de biogás pode gerar até 6 vezes mais massa salarial e 5,5 vezes mais empregos, o que tem que para reduzir desigualdades sociais nessas regiões tradicionalmente carentes.

O IDH-T mostrou-se uma métrica útil e prática para aferição de impactos sociais, particularmente para um setor desprovido de dados como o analisado neste estudo. Esse quadro predispôs a formulação de suposições e aproximações que, naturalmente, aumentam o grau de incerteza dos resultados. Para amortecer esses efeitos, e ao mesmo tempo, aumentar a margem de assertividade do indicador, optou-se por considerar para efeito dessa avaliação situações otimistas e pessimistas, a depender do nível tecnológico empregado e grau de especialização dos trabalhadores envolvidos na operação das usinas. Ainda que a literatura não traga registros a respeito dessa variação metodológica, condição que a torna inédita, esforços devem ser empreendidos para que o IDH-T seja mais robusto e conclusivo. Esses status serão alcançado com a criação de bases de dados atualizadas e representativas para variadas situações e circunstâncias de análise, e o refreamento da subnotificação dos registros de acidentes, que condiciona seriamente a estimativa do índice saúde ($I_{saúde}$). Nesse mérito, uma alternativa efetiva seria substituir aquele parâmetro pela Taxa de acidentes com afastamento. Outra medida que traria ganhos de abrangência e precisão para o IDH-T, seria adicionar às componentes usadas para sua estimativa uma dimensão de desigualdade social. A abordagem dessas, e outras,

recomendações sob a perspectiva do rigor técnico e do método científico se converte em tema para pesquisas no campo da ACV-S, com vistas a ratificá-la com métrica congruente na busca pela Sustentabilidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por medidas ambientais e sociais que fossem capazes de representar a viabilidade da geração de energia para comunidades amazônicas por meio de recursos disponíveis localmente teve o intuito, não apenas de abordar questões de avaliação de projetos para além do ponto de vista econômico, mas também, de ser mais um documento de informação, consulta e argumentação acerca das necessidades de uma região marginalizada do Brasil. Esse trabalho de pesquisa se propôs a quantificar, utilizando ferramentas da engenharia, os impactos causados pela geração elétrica a biogás e concluiu que, quando obedecidos alguns critérios abordados nos capítulos 4 e 5 deste documento, os indicadores ambientais apresentaram uma vantagem expressiva da geração a biogás e quanto a indicadores sociais, não representou desvantagem significativa, além de incluir muito mais pessoas nas cadeias produtivas e incentivar a distribuição de renda em regiões empobrecidas.

É importante destacar, porém, que as metodologias utilizadas no estudo possuem algumas limitações intrínsecas, como é o caso do dimensionamento da planta de geração elétrica a biogás que se baseou em documentos científicos e equações gerais e portanto podem apresentar variações em relação a projetos reais quando implementados nas regiões particulares do presente estudo. Além disso, os estudos ambientais e sociais se limitaram a selecionar apenas algumas métricas para medir os impactos nesses campos, esse é o caso das três categorias de impacto ambiental, GWP, PED e FWET, e dos três indicadores sociais, escolaridade, renda e taxa de acidentes, para representar as medidas de impacto ambiental e social como um todo. Vale destacar também a necessidade de aproximações para a estimativa dos índices socioambientais dos cenários, o que se fez bastante necessário já que o trabalho é caracterizado por um estudo prospectivo. Porém, a adoção de um grande número de cenários no estudo ambiental e variações otimistas e pessimistas no estudo social tiveram o objetivo de diminuir o caráter determinístico do estudo e indicar tendências nos impactos ambientais e sociais a depender de características de projetos semelhantes aos casos estudados.

A organização no tempo das etapas do presente estudo priorizaram o aspecto técnico, ambiental e social, nesta ordem, não por acaso. O objetivo sempre foi discutir a viabilidade de um projeto de geração de energia renovável (técnico), entender seus impactos no meio ambiente (ambiental) e avaliar se ele tem potencial para melhorar a qualidade de vida dos habitantes locais (social), isso foi feito pensando, sim, em aspectos econômicos como preço do combustível e salários, mas não de maneira profunda a ponto de apontar a sustentabilidade

econômica do projeto. Portanto, a realização de uma avaliação econômica da geração de energia a biogás na Amazônia é fortemente encorajada como foco de pesquisas futuras.

Por fim, a realização do presente estudo se mostrou sobretudo, uma tarefa gratificante para o autor. Não apenas pelo fato de ter encontrado uma janela de oportunidade para discutir problemas sociais e ambientais da Amazônia com uma abordagem de engenharia na maior universidade do País, mas também por apontar caminhos para o desenvolvimento de uma região chave e ainda muito estigmatizada, onde vivem muitos dos amigos e parentes do autor, que são, não a única, mas grande parte da fonte de motivação para a realização do estudo que foi apresentado.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5626. Instalação predial de água fria. 1998.
- ACHINAS S.; EUVERINK, G. J. W. Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies* n. 2, p.143–147. 2016.
- ADEOYE, P. A.; ADEBAYO, S. E.; MUSA, J. J. Agricultural post-harvest waste generation and management for selected crops in Minna, Niger State, north central Nigeria. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 6 (4):427-435. 2011.
- AKBULUT, A. Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Çiçekdağı case study. *Energy* 44, p. 381-390. 2012.
- AKBULUT, A.; ARSLAN, O.; ARAT, H.; ERBAS, O. Important aspects for the planning of biogas energy plants: Malatya case study Abdullah. *Case Studies in Thermal Engineering* 26, 101076. 2021.
- ALAKHAYAT, W. A.; GERRARD, A. M. Estimating Mannings Levels for Process Plants, *AACE Transactions*, I.2.1-I.2.4. 1984.
- ANDRADE, C. S.; ROSA, L. P.; SILVA, N. F. Generation of electric energy in isolated rural communities in the Amazon Region a proposal for the autonomy and sustainability of the local populations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, 493–503. 2011.
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2021. Anuário Estatístico Brasileiro Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2021>> . Acesso em: 19 Jan. 2023.
- ARAÚJO, C. F. Eletrificação rural em comunidades isoladas na Amazônia: Introdução da energia solar fotovoltaica na reserva extrativista do Rio Unini, AM. Universidade Federal do Amazonas centro de ciências do ambiente - CCA Programa de Pós-graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia – PPG/CASA Mestrado Acadêmico. 2014.
- ASHRAF, M.; RAMZAN, N.; KHAN, R. U.; DURRANI, A. K. Analysis of mixed cattle manure: Kinetics and thermodynamic comparison of pyrolysis and combustion processes. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 26, 2021, 101078.
- ASSA, J. Less is more: The implicit sustainability content of the human development index. *Ecological Economics* 185, 107045. 2021.
- ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MATO GROSSO., Anexo 1 – apendice a – plano de manutenção preventiva. 2023. Disponível em: <<https://storage.al.mt.gov.br/api/v1/download/default/345795>>. Acesso em 17 fev. 2023.
- BACHMANN, S.; UPTMOOR, R.; EICHLER-LÖBERMANN, B. Phosphorus distribution and availability in untreated and mechanically separated biogas digestates. *Scientia Agricola*. v.73, n.1, p.9-17. January/February 2016.
- BAKKALOGLU, S.; LOWRY, D.; FISHER, R. E.; FRANCE, J. L.; BRUNNER, D.; CHEN, H.; NISBET, E. G. Quantification of methane emissions from UK biogas plants. *Waste Management*, v. 124, p. 82–93. 2021.

- BARATA, R. B.; RIBEIRO, M. C. S. A.; MORAES, J. C. Acidentes de trabalho referidos por trabalhadores moradores em área urbana no interior do Estado de São Paulo em 1994. 2000. *Inf Epidemiológico Do SUS* 9:199–210. Disponível em: <http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-16732000000300005>. Acesso em: 17 fev. 2023.
- BEZERRA, P.; CRUZ, T.; MAZZONE, A.; LUCENA, A. F. P.; DE CIAN, E.; SCHAEFFER, R. The multidimensionality of energy poverty in Brazil: A historical analysis. *Energy Policy*, 171, 113268. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113268>
- BUSWELL, A.M.; HATFIELD, W.D. Bulletin No. 32, Anaerobic Fermentations, State of Illinois, Department of Registration and Education, Division of the State Water Survey, Urbana, Illinois, 1936. Disponível em: <<https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/B/ISWSB-32.pdf>>. Acesso em: 11/07/2022.
- CALVO, L. F.; GIL, M. V.; OTERO, M.; MORÁN, A.; GARCÍA, A. I. Gasification of rice straw in a fluidized-bed gasifier for syngas application in close-coupled boiler-gasifier systems. *Bioresource Technology*, v.109, p. 206–214. 2012.
- CARMO, B. B. T.; MARGNI M.; BAPTISTE P. Social impacts profile of suppliers: A S-LCA approach. *IFAC-Papers OnLine* 49-2, 036–041. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.03.007>
- CARPIO, B.; AVENDANO, C. I. L.; BASBAS, C. A.; HABULAN, A. A.; GUERRERO, G. A. M.; MAGUYON-DETRAS, M. C.; BAMBASE JR, M. E. Assessing the effect of K₂CO₃ and aqueous phase recycling on hydrothermal liquefaction of corn stover. *Bioresource Technology Reports*, v. 18, p. 101093. 2022.
- CCEE. Premissas Orçamentárias Contas Setoriais 2022. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2022/2026 – Ciclo 2021.
- CHEN, H.; ZHANG, W.; WU, J.; CHEN, X.; LIU, R.; HAN, Y.; XIAO, B.; YU, Z.; PENG, Y. Improving two-stage thermophilic-mesophilic anaerobic co-digestion of swine manure and rice straw by digestate recirculation. *Chemosphere* 274, 129787. 2021.
- CHEN, Y. R. Thermal Properties of Beef Cattle Manure. *Agricultural Wastes*, v. 6, p. 13-29. 1983.
- CHENG, X. ZHONG C. Effects of feed to inoculum ratio, co-digestion, and pretreatment on biogas production from anaerobic digestion of cotton stalk. *Energy Fuel* v. 28, p. 3157–3166. 2014.
- CONVEYOR ENG. & MFG. CO. Screw Conveyor components & design. versão 2.20. 2012.
- CORDEIRO, R.; SAKATE, M.; CLEMENTE, A. P. G.; DINIZ, C. S.; DONALISIO, M. R. Subnotificação de acidentes do trabalho não fatais em Botucatu, SP, 2002. *Rev. Saúde Pública* 39:254–260. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102005000200017>
- CORONA, B.; BOZHILOVA-KISHEVA, K.P.; OLSEN, S.I.; SAN MIGUEL, G. Social life cycle assessment of a concentrated solar power plant in Spain: a methodological proposal. *J. Ind. Ecol.* 21, 1566e1577. 2017. <https://doi.org/10.1111/jiec.12541>
- DOKA, G. Life Cycle Inventories of Waste treatment Services – Part IV “Wastewater Treatment”. Ecoinvent report n° 13. Swiss Center for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.

EIA - U.S. Energy Information Administration. 2023. Gasoline and Diesel Fuel Update. Disponível em: <<https://www.eia.gov/petroleum/gasdiesel/>> Acesso em: 19 Jan. 2023

EL-MASHAD, H. M.; LOON, W. K. P.; ZEEMAN, G.; BOT, G. P. A. Rheological properties of dairy cattle manure. *Bioresource Technology*, v. 96, p. 531–535. 2005.

ENVITEC BIOGAS. Detailed Project Report for Biogas Power Plant + Organic Fertilizer Unit in Namakkal District, Tamil Nadu. 2008.

EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2020/2025 – Ciclo 2020. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-614/EPE-NT-Planejamento%20SI-ciclo_2020.pdf>. Acesso em: 11/03/2022.

EPE. Balanço Energético Nacional – Relatório final 2020. 2021.

EPE. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL- Relatório final 2021. 2022.

EXÉRCITO BRASILEIRO, 2021. Militares Da Operação Transamazônica Chegam Ao Coração Da BR-230. <https://www.eb.mil.br/> Acesso em: 15 Dez. 2022.

FLORINDO, T. J.; FLORINDO, G. I. B. M.; TALAMINI, E.; COSTA, J. S; LÉIS, C. M.; TANG, W. Z.; SCHULTZ, G.; KULAY, L.; PINTO, A. T.; RUVIARO, C. F. Application of the multiple criteria decision-making (MCDM) approach in the identification of Carbon Footprint reduction actions in the Brazilian beef production chain. *Journal of Cleaner Production* v 196, p 1379-1389. 2020.

FREDENSLUND, A. M.; HINGEB, J.; HOLMGRENC, M. A.; RASMUSSEN, S. G.; SCHEUTZA, C. On-site and ground-based remote sensing measurements of methane emissions from four biogas plants: A comparison study. *Bioresource Technology*, v. 270, p. 88–95. 2018.

FRISCHKNECHT, R.; JUNGBLUTH, N.; et.al. (2003). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000, Swiss Centre for LCI. Duebendorf, CH. Disponível em: <www.ecoinvent.ch>. 2003.

FRISCHKNECHT, R.; TUCHSCHMID, M.; FAIST EMMENEGER M.; BAUER, C.; DONES, R. Strom mix und Strom netz. In: Dones, R.; editors *Sachbilanzen von Energie systemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energie systemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. Ecoinvent report no. 6 Paul Scherrer Institut Villigen. Swiss Centre for Life Cycle Inventories; Duebendorf, Switzerland; 2007.

GONÇALVES, S.; RODRIGUES, T. P.; CHAGAS, A. L. S. The impact of wind power on the Brazilian labor market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 128, 109887. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109887>

GURUSWAMY, L. Energy Justice and Sustainable Development, 21 *COLO. J. INT'L ENVTL. L. & POL'Y* 231, 2010. Disponível em: <<https://scholar.law.colorado.edu/articles/231>>. Acesso em: 11/07/2022.

GURUSWAMY, L.; 2010. Energy Justice and Sustainable Development, 21 *COLO. J. INT'L ENVTL. L. & POL'Y* 231, 2010. Disponível em: <<https://scholar.law.colorado.edu/articles/231>>. Acesso em: 11 Jul. 2022

HAGOS, K.; JIANPENG, Z. D. L.; CHANG, L.; XIAOHUA, L. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 76, p. 1485–1496. 2017.

HÄMÄLÄINEN, P.; TAKALA, J.; SAARELA, K. L. Global estimates of occupational accidents. *Saf Sci* 44:137–156. 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.08.017>>

HARSDORFF, M. The economics of biogas: Creating green jobs in the dairy industry in India. Green Jobs Programme. ILO Country office for India. 2014.

HE, C.; CAO, F.; WEI, Y.; ZHAO, Z.; CUI, L.; QIN, Y.; VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G. Morphological changes and ash fusibility of coal, rice straw and their mixture during CO₂ gasification. *Fuel*, v. 292, 120372. 2021.

HODNEBROG, Ø.; ETMINAN M.; FUGLESTVEDT, J. S.; MARSTON, G.; MYHRE, G.; NIELSEN, C. J.; SHINE, K. P.; WALLINGTON, T. J. Global warming potentials and radiative efficiencies of halocarbons and related compounds: A comprehensive review. *Rev. Geophys.*, 51, 300-378, doi:10.1002/rog.20013. Spreadsheet: <<http://folk.uio.no/oivinho/halocarbonmetrics/>>. 2013.

HOLLAND, F. A.; BRAGG, R. Fluid Flow for Chemical Engineers. Edward Arnold, 2^a ed. 1995.

HONGYAN, L.; JIONG, Y.; BING, X.; HECK, P. Cooperation Challenges of Developing Centralized Biogas Plant in China-A Material Flow Management Approach. *International Journal of Energy Science (IJES)*, Volume 3, Issue 2, p. 60. April 2013.

HRAD, M.; PIRINGER, M.; HUBER-HUMER, M. Determining methane emissions from biogas plants – Operational and meteorological aspects. *Bioresource Technology*, v. 191, p. 234–243. 2015.

HU, E.; TIAN, Y.; YANG, Y.; DAI, C.; LI, M.; LI, C.; SHAO, S. Pyrolysis behaviors of corn stover in new two-stage rotary kiln with baffle b. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 161, p. 105398. 2022.

HUARACHI, D. A. R.; PIEKARSKI C. M.; PUGLIERI, F. N.; FRANCISCO, A. C. Past and future of Social Life Cycle Assessment: Historical evolution and research trends. *Journal of Cleaner Production* 264 – 121506. 2020.

HUIJBREGTS, M.A.J.; STEINMANN Z.J.N.; ELSHOUT P.M.F.; STAM G.; VERONES F.; VIEIRA M.; ZIJP M.; HOLLANDER A.; VAN ZELM R. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess* (2017) 22: 138: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1246-y>>. 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020c. Estimativas da População. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=28674&t=resultados>> Acesso em: 19 Jan. 2023.

IBGE Cidades. Panorama. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>>, acesso em 03/02/2021.

IBGE. PIA-Empresa - Pesquisa Industrial Anual 2020d. – Empresa. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9042-pesquisa-industrial-anual.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 27 Jan. 2023.

IBGE. Censo Agropecuário 2017: Resultados definitivos. 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em 07/02/2021.

IBGE. Pesquisa da Pecuária Municipal – PPM. 2020a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?edicao=31709&t=resultados>>. Acesso em: 12/07/2022.

IBGE. Produção Agrícola Municipal – PAM. 2020b. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 12/07/2022.

IEA BIOENERGY. MAABJERG BIOGAS PLANT - OPERATION OF A VERY LARGE SCALE BIOGAS PLANT IN DENMARK. BIOGAS IN SOCIETY A Case Story from IEA BIOENERGY TASK 37. “Energy from Biogas”. 2014.

IEMA. Acesso aos serviços de energia elétrica nas comunidades isoladas da Amazônia: mapeamento jurídico-institucional. 2018. Disponível em: <<https://iema-site-staging.s3.amazonaws.com/2018.06.17-NT-SISOL.pdf>> . Acesso em: 22 Fev. 2021.

INDRAWANA, N.; THAPAA, S.; WIJAYAC, M. E.; RIDWANB, R.; PARKD, D. The biogas development in the Indonesian power generation sector. *Environmental Development*, v. 25, p.85–99. 2018.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2022.

IRENA. RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2021. 2021.

ISO - International Organization for Standardization. ISO 14044, *Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines*. 1st ed. (Genève, Switzerland), 2006.

JIADONG, Y.; LIXIN, Z.; JING, F.; ZONGLU, Y.; KAIMING, H.; JUAN, L.; SHIMENG, W.; JIANKUN, C. Sequencing batch dry anaerobic digestion of mixed feedstock regulating strategies for methane production: Multi-factor interactions among biotic and abiotic characteristics. *Bioresource Technology*, v. 284, p. 276–285. 2019.

JIANBO L.; XIANYI G. Biogas: Potential, challenges, and perspectives in a changing China. *Biomass and Bioenergy*. V. 150, 106127. July 2021.

KIRAN, E. U.; STAMATELATOU, K.; ANTONOPOULOU, G.; LYBERATOS, G. Production of biogas via anaerobic digestion. National Technical University of Athens, Athens, Greece. *Handbook of Biofuels Production*, 2e. 2016.

KIRK, D. M.; GOULD, M. C. Bioenergy and anaerobic digestion. In: Dahiya, A. *Bioenergy (Second Edition): Biomass to Biofuels and Waste to Energy*. p. 335-360. 2020.

LINQUIST B.; SENGXUA, P. Nutrient management of rainfed lowland rice in the Lao PDR. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute. p. 88. 2001.

MACOMBE, C.; LESKINEN, P.; FESCHET, P.; ANTIKAINEN, R. Social life cycle assessment of biodiesel production at three levels: a literature review and development needs. *Jornal of Cleaner Production*. Vol 52, pp 205-216. 2013.

MEHTA, S.; MINZ, P. S.; CHITRANAYAK; RAJU, P. N.; BEHARE, P. Estimation of rheological properties of cow manure slurry using simulation method. *The Pharma Innovation Journal* SP-11(2): 1023-1026. 2022.

MIRANDA, D. S.; KULAY, L. A prospective study on the environmental feasibility of supplying electricity to the Brazilian Amazon through biogas power generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 55 (2023) 102962. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102962>

MOORE, C. C. S.; KULAY, L. Effect of the implementation of carbon capture systems on the environmental, energy and economic performance of the Brazilian electricity matrix. *Energies* 12(2). 2019. doi: 10.3390/en12020331.

MORITA, A. M.; MOORE, C. C. S.; NOGUEIRA, A. R.; KULAY, L.; RAVAGNANI, M. A. A. S. Assessment of potential alternatives for improving environmental trouser jeans manufacturing performance in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 247, 119156. 2020.

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego, 2022b. Seção I - Estatísticas de Acidentes do Trabalho. https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/assuntos/previdencia-social/saude-e-seguranca-do-trabalhador/dados-de-acidentes-do-trabalho/arquivos/AEAT_2020/secao-i-estatisticas-de-acidentes-do-trabalho>. Acesso em: 19 Dez. 2022.

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego, Brasil. Programa de disseminação de estatística do trabalho. 2022a. Disponível em: <<http://acesso.mte.gov.br/portal-pdet/o-pdet/portifolio-de-produtos/bases-de-dados.htm>>. Acesso em: 16 Dez. 2022.

MTE, 2023. CBO - CBO - Classificação Brasileira de Ocupações. Disponível em: <<https://cbo.mte.gov.br/cbsite/pages/home.jsf>>. Acesso em: 30 Jan. 2023.

MUHAYODIN F.; FRITZE, A.; ROTTER, V. S. Mass Balance of C, Nutrients, and Mineralization of Nitrogen during Anaerobic Co-Digestion of Rice Straw with Cow Manure. *Sustainability*, 13, 11568. 2021.

MURILLO-ALVARADO, P. E.; PONCE-ORTEGA, J. M. An optimization approach to increase the human development index through a biogas supply chain in a developing region. *Renewable Energy* 190, 347e357. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.076>

MWIRIGI, J.; BALANA, B. B.; MUGISHA, J.; WALEKHWA, P.; MELAMU, R.; NAKAMI, S.; MAKENZI, P. Socio-economic hurdles to widespread adoption of small-scale biogas digesters in Sub-Saharan Africa: A review. *Biomass and Bioenergy* 70, p. 17 – 25. 2014.

NISAMANEENATE, J.; ATONG, D.; SEEMEN, A.; SRICHAROENCHAikul, V. Mitigating bed agglomeration in a fluidized bed gasifier operating on rice straw. *Energy Reports*, v. 6, p. 275–285. 2020.

NNFCC. Report Title: UK jobs in the bioenergy sectors by 2020. Project Number: 11-025. A report for DECC. Abr. 2012.

OBSERVATÓRIO DE SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO. Estimativa de Subnotificação de Acidentes de Trabalho (CAT). Disponível em: https://smartlabbr.org/sst/localidade/0?dimensao=frequenciaAcidentes#bar_subnotificacao Acesso em: 19 Dez. 2022.

OGUNJUYIGBE, A. S. O.; AYODELE, T. R. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-Diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building. *Appl. Energy* 171, 153e171. 2016.

ÖNEN, S.; NSAIR, A.; KUÇHTA, K. Innovative operational strategies for biogas plant including temperature and stirring management. *Waste Management & Research*, Vol. 37(3), p. 237–246. 2019.

ONS, 2020. Plano anual da operação energética dos sistemas isolados para 2021. Disponível em:

http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/SUMARIO_EXECUTIVO_PEN_SISOL_2021.pdf>. Acesso em: 07 Mar. 2022.

ONU. The SDGs in action. Disponível em: undp.org/sustainable-development-goals?utm_source=EN&utm_medium=GSR&utm_content=US_UNDP_PaidSearch_Brand_English&utm_campaign=CENTRAL&c_src=CENTRAL&c_src2=GSR&gclid=Cj0KCQjwIK-WBhDjARIsAO2sErQ6f8BMUXCovpcJ9iplTSS-VNOB_7LMjqg56c7UiK8Hsq8s-FnWiRgaArYCEALw_wcB>. Acesso em: 11/07/2022.

OYEDEJI, O. A.; PECHA, M. B.; FINNEY, C. E. A.; PETERSON, C. A.; SMITH, R. G.; MILLS, Z. G.; GAO, X.; SHAHNAM, M.; ROGERS, W. A.; CIESIELSKI, P. N.; BROWN, R. C.; PARKS II, J. E. CFD–DEM modeling of autothermal pyrolysis of corn stover with a coupled particle- and reactor-scale framework. *Chemical Engineering Journal*, v. 446, p. 136920. 2022.

PANUCCIO, M. R.; ATTINA, E.; BASILE, C.; MALLAMACI, C.; MUSCOLO, A. Use of Recalcitrant Agriculture Wastes to Produce Biogas and Feasible Biofertilizer. *Waste Biomass Valor*, v. 7, p. 267–280. 2016.

PEGURIER, E.; SÁ, M. I. Na estrada: provando o chão de terra da Transamazônica. *OECO*. 2013. Disponível em: <https://oeco.org.br/reportagens/27389-na-estrada-provando-o-chao-de-terra-da-transamazonica/>> Acesso em: 15 Dez. 2022.

PIEKUTIN, J.; PUCHLIK, M.; HACZYKOWSKI, M.; DYCZEWSKA, K. The Efficiency of the Biogas Plant Operation Depending on the Substrate Used. *Energies* 14, 3157. 2021.

PORTO, R. M. HIDRÁULICA BÁSICA. 4ª EDIÇÃO. Publicação EESC-USP-São Carlos, SP, 2006.

QI, G.; PAN, Z.; ANDRIAMANOHIARISOAMANANA, F. J.; YAMASHIRO, T.; IWASAKI, M.; IHARA, I.; UMETSU, K. Effect of solid–liquid separation on anaerobic digestion of dairy manure in semi-continuous stirred tank reactors: Process performance and digestate characteristics. *Animal Science Journal*. 13393. 2020.

QIANQIAN, L.; ZHENGANG, L.; YUFEI, L.; JUNXIANG, X.; JIJIN, L.; BENSHENG, L.; QINPING, S. Combustion characteristics, kinetic and thermodynamic analyses of hydrochars derived from hydrothermal carbonization of cattle manure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, p. 106938. 2022.

QUAN, L.; RUOLAN, X.; CUIQIANG, Y.; LUJIA, H.; HANWU, L.; ROGER, R.; XUESONG, Z. Fast hydrothermal co-liquefaction of corn stover and cow manure for biocrude and hydrochar production. *Bioresource Technology*, v. 340, p. 125630. 2021.

REN, J.; MANZARDO, A.; MAZZI, A.; ZULIANI, F.; SCIPIONI, A. Prioritization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. *Int J Life Cycle Assess* 20:842–853. 2015.

RIBAS, V. E.; SIMÕES, A. F. (In)justiça energética: definição conceitual, parâmetros e aplicabilidade no caso do Brasil. *Revista Brasileira de Energia* | Vol. 26, Nº 4, 4º Trimestre de 2020. DOI: 10.47168/rbe.v26i4.580.

ROSSETTO, R. M. Otimização De Comboio Empurrador-Balsa No Transporte Fluvial. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica. 2013. Disponível em: <https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufjr-peno_upl/THESIS/6000267/2013_mestrando_renan_maziero_rossetto_2020040520122628.pdf>. Acesso em: 31 Jan. 2023.

RUPF, G. V.; BAHRI, P. A.; BOER, K.; MCHENRY, M. P. Barriers and opportunities of biogas dissemination in Sub-Saharan Africa and lessons learned from Rwanda, Tanzania, China, India, and Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, issue C, 468–476. 2015.

SÁNCHEZ, A. S.; TORRES, E. A.; KALID, R.A. Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 49, 278–290. 2015.

SANFORD, J. Manure management and labor – you might be surprised. AG Proud. 2016. Disponível em: <<https://www.agproud.com/articles/19896-manure-management-and-labor-you-might-be-surprised>>. Acesso em: 03 Jan. 2023

SCHEUTZ, C.; FREDENSLUND, A. M. Total methane emission rates and losses from 23 biogas plants. *Waste Management*, v. 97, p. 38–46. 2019.

SCHLÖR, H.; KOJ, J.; ZAPP, P.; SCHREIBER, A.; HAKE, J-F. The social footprint of hydrogen production - A Social Life Cycle Assessment (S-LCA) of alkaline water electrolysis. *Energy Procedia*. 105, 3038 – 3044. 2017.

SCHNÜRER, A.; BOHN, I.; MOESTEDT, J. Protocol for Start-Up and Operation of CSTR Biogas Processes. *Hydrocarbon and Lipid Microbiology Protocols*. 2017.

SINGH, R.; PATEL, M. Effective utilization of rice straw in value-added by-products: A systematic review of state of art and future perspectives *Biomass and Bioenergy*, v. 159, p. 106411. 2022.

SOTOMAIOR, O. J. Can the minimum wage reduce poverty and inequality in the developing world? Evidence from Brazil. *World Development*. 138, 105182. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105182>

SOUZA, A.; WATANABE, M. D. B.; CAVALETT, O.; CUNHA, M.; UGAYA, C. M. L.; BONOMI, A. A novel social life cycle assessment method for determining workers' human development: a case study of the sugarcane biorefineries in Brazil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 26:2072–2084. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01936-8>

SPX FLOW. Preventive Maintenance Checklist - PLATE HEAT EXCHANGERS. 2021b. Disponível em: <<https://www.spxflow.com/assets/pdf/APV-Heat-Exchangers-Plate-Maintenance-Checklist-1237-FLR-US.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2023.

SPX FLOW. Preventive Maintenance Checklist - POSITIVE DISPLACEMENT PUMPS. 2021a. Disponível em: <<https://www.spxflow.com/assets/pdf/WCB-Pumps-PD-Maintenance-Checklist-FH-1912-FLR-US.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2023.

SPYRIDONIDIS, A.; VASILIADOU, I. A.; AKRATOS, C. S.; STAMATELATOU, K. Performance of a Full-Scale Biogas Plant Operation in Greece and Its Impact on the Circular Economy. *Water*, v. 12, p. 3074. 2020.

SURPRESA. Balsas, 2023. Disponível em: <http://www.superpesa.com.br/?page_id=76>. Acesso em: 31 Jan. 2023.

TAKEDA, S.; KEELEY, A.R.; SAKURAI, S.; MANAGI, S.; NORRIS, C.B. Are renewables as friendly to humans as to the environment? A social life cycle assessment of renewable electricity. *Sustain. Times* 11, 1370. 2019. <https://doi.org/10.3390/su11051370>.

TAMBONE, T.; ORZI, V.; D'IMPORZANO, G.; ADANI, F. Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. *Bioresource Technology* 243, 1251–1256. 2017.

TIANCHI, L.; MENG, F.; ZHANG, M.; QINGYU, L. Effects of different low temperature pretreatments on properties of corn stover biochar for precursors of sulfonated solid acid catalysts. *Bioresource Technology*, v. 357, p. 127342. 2022.

TURTON, R.; BAILIE, R. C.; WHITING, W. B.; SHAIWITZ, J. A.; BHATTACHARYYA, D. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Process*. Prentice Hall 4th edition. 2012.

UFBA. Transportadores Contínuos Para Granéis Sólidos. Cap. 9. Disponível em: <<https://www.scribd.com/document/457561994/3-Transportadores-Continuos-Para-Graneis-Solidos-UFBA-Acesso-Em-11-04-2017>>. Acesso em 02/08/2022.

UNDP. UNDP Human Development Report Office. Training Material for Producing National Human Development Reports. 2015. Disponível em: <<https://hdr.undp.org/system/files/documents/hditrainingpdf.pdf>>. Acesso em: 27 Jan. 2023.

UNEP. Guidelines for social life cycle assessment of products and organizations 2020. United Nations Environmental Programme (UNEP). 2020.

WANG, H.; AGUIRRE-VILLEGAS, H. A.; LARSON, R. A.; ALKAN-OZKAYNAK, A. Physical Properties of Dairy Manure Pre- and Post-Anaerobic Digestion. *Applied Science*, v. 9, 2703. 2019.

WANG, S.; SU, D.; WU, Y. Environmental and social life cycle assessments of an industrial LED lighting product. *Environmental Impact Assessment Review*. 95, 106804. 2022.

WEG, 2003. Manual de instalação e manutenção motores elétricos de indução trifásicos de alta e baixa tensão. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM249/Material%20de%20aula/MOTORES%20-%20WEG.pdf>>. Acesso em: 27 Jan. 2023.

WERKER, J.; WULF, C.; ZAPP, P. Working conditions in hydrogen production: a social life cycle assessment. *J. Ind. Ecol.* 2019. <https://doi.org/10.1111/jiec.12840>

XIAOJIAO, W.; GAIHE, Y.; YONGZHONG, F.; GUANGXIN, R.; XINHUI, H. Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. *Bioresource Technology*, v. 120, p. 78–83. 2012.

XIAOLIN, F.; ZIFU, L.; TINGTING, W.; FUBIN, Y.; XIN, Y. Introduction to a large-scale biogas plant in a dairy farm. International Conference on Digital Manufacturing & Automation. 2010.

ZABATT. Routine Compressor Maintenance. 2023. Disponível em: <<https://www.quincycompressor.com/wp-content/uploads/2020/08/zabatt-compressor-maintenance.pdf>>. Acesso em 17 fev. 2023.

ZHANG, Y.; LI H. Energy recovery from wastewater treatment plants through sludge anaerobic digestion: effect of low-organic-content sludge. Environmental Science and Pollution Research. v. 26, p. 30544–30553. 2019.

ZHANG, Y.; QUN, J.; WEILING, X.; YIFAN, W.; JIAMING, K. Effects of temperature, time and acidity of hydrothermal carbonization on the hydrochar properties and nitrogen recovery from corn stover. Biomass and Bioenergy, v. 122, p.175–182. 2019.

ZHENG Z.; CAI, Y.; ZHAO, Y.; MENG, X.; ZHANG Y.; LU, C.; HU, Y.; CUI, Z.; WANG, X. Achieve clean and efficient biomethane production by matching between digestate recirculation and straw-to-manure feeding ratios. Journal of Cleaner Production, 263, 121414. 2020.

ZWIETERING, M. H.; JONGENBURGER, I.; ROMBOUTS, F.M.; VAN'TRIET, K. Modeling of the Bacterial Growth Curve. APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY, p.1875-1881. 1990.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Dimensionamento dos equipamentos utilizados na usina de produção de energia elétrica a biogás

Bombas

Para o dimensionamento de todas as bombas do modelo aplicou-se o teorema de Bernoulli:

$$H = \frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g\alpha} + h_p \quad Eq. 1$$

Onde:

H = Altura manométrica real

$\frac{\Delta P}{\gamma}$ = diferença de pressão piezométrica

$\Delta Z = Z_2 - Z_1$ = recalque

v_1 e v_2 = velocidades de escoamento no tubo

g = aceleração da gravidade

α = fator de correção considerado igual a 1

h_p = perda de carga

A diferença de pressão piezométrica foi considerada sendo igual a 0 por não haver mudanças significativas na pressão externa ao sistema.

Os recalques, $Z_2 - Z_1$, foram calculados com base na diferença entre as alturas dos tanques cilíndricos entre os quais o fluido precisa ser bombeado. Os volumes dos tanques V_T variaram de acordo com cada cenário e os raios dos cilindros R_T obedeceram uma proporcionalidade com a altura dos mesmos fixada em $(2R_T)/H=1$. Assim, os recalques das bombas obedeceram a equação Eq. 2.

$$Z_2 - Z_1 = \frac{V_{T2}}{\pi R_{T2}^2} - \frac{V_{T1}}{\pi R_{T1}^2} \quad Eq. 2$$

As velocidades de escoamento, v , foram calculadas através da vazão, Q , e do diâmetro, D , da tubulação de acordo com a equação Eq. 3.

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Para a qual, o diâmetro da tubulação, D , foi calculado de acordo com a fórmula da ABNT (NBR-5626) (ABNT, 1998), representada na equação Eq. 4, recomendada para funcionamento intermitente ou não-contínuo. Onde T = período (número horas de funcionamento da bomba por dia).

$$D = 1,3 \sqrt[4]{\frac{T}{24}} \sqrt{Q} \quad \text{Eq. 4}$$

A perda de carga, h_p , foi calculada através da expressão de Darcy-Weisbach:

$$h_p = f \frac{Lv^2}{2gD} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

L = comprimento da tubulação

v = velocidade de escoamento

g = aceleração da gravidade

D = diâmetro da tubulação

f = fator de atrito

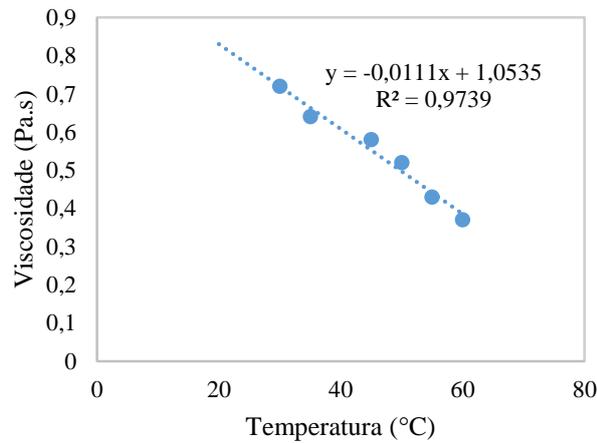
Em todos casos, a aceleração da gravidade foi considerada igual a 9,806 m/s², O comprimento da tubulação foi exagerado para 100 m a fim de incorporar a perda de carga referente às perdas localizadas em componentes da tubulação como curvas e válvulas, uma vez estes são difíceis de prever para um modelo teórico, e o fator de atrito, f , foi calculado para escoamento em regime turbulento em uma tubulação de aço carbono.

Propriedades do fluido como viscosidade e massa específica foram obtidos através de dados da literatura que mediram essas propriedades para diferentes teores de sólidos e temperaturas em esterco bovino (EL-MASHAD et al, 2005; METHA et al, 2022; CHEN, 1983; WANG et al, 2019). A equação Eq. 6 extraída de Chen (1983) foi usada para calcular a massa

específica do esterco bovino em função do teor de sólidos e o ajuste linear dos dados experimentais extraídos de El-Mashad (2005) foi usado para estimar a viscosidade do esterco nas condições estabelecidas para o dimensionamento da usina de biogás.

$$\rho = \frac{998}{1 - 0,00345TS} \quad \text{Eq.6}$$

Figura A. 1 - Relação da viscosidade com a temperatura para esterco bovino.



Uma vez determinada a altura manométrica H, a potência, P_B, da bomba requerida para cada trecho de tubulação foi calculada através da equação Eq. 7 (PORTO, 2006).

$$P_B = \frac{Q * H * \rho * g}{\eta} \quad \text{Eq.7}$$

Onde:

P_B = Potência da bomba

Q = Vazão volumétrica

H = Altura manométrica

ρ = massa específica do fluido

g = aceleração da gravidade

η = Eficiência da bomba (considerado igual a 0,8)

Os resultados das potências das bombas B1, B2, B3, B4, B5 e B6, em kWh/dia, são apresentados na Tabela A.1 e as posições das bombas no modelo podem ser observadas na Figura A.2.

Figura A. 2. Diagrama da usina a biogás com destaque para a posição das bombas.

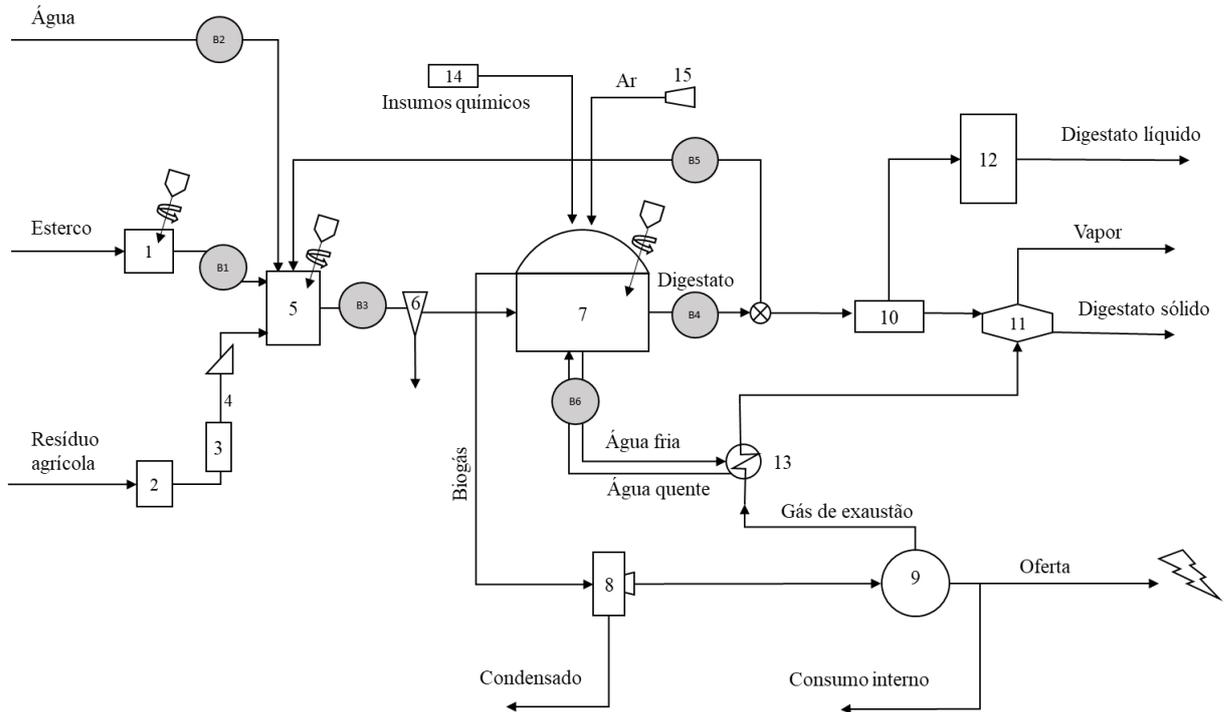


Tabela A. 1. Potências das bombas em cada cenário, em kWh/dia.

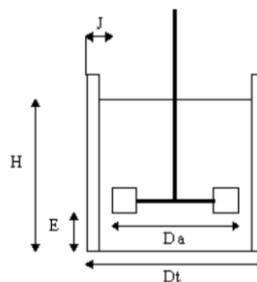
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
C1	47,9	85,2	145,3	0,0	10,1	0,2
C2	40,6	61,9	115,4	0,0	7,1	0,1
C3	44,0	33,2	115,0	0,0	7,1	0,1
C4	149,0	286,0	671,0	0,0	47,0	0,9
C5	110,0	207,7	510,5	0,0	32,4	0,7
C6	350,3	576,8	1715,4	0,0	117,7	3,4
C7	416,6	325,0	1705,6	0,0	117,0	3,4
C8	248,3	418,4	1293,3	0,0	80,7	2,2
C9	295,1	224,8	1287,8	0,0	80,4	2,2
C10	47,9	85,2	145,3	0,0	10,1	0,2
C11	40,6	61,9	115,4	0,0	7,1	0,1
C12	44,0	33,2	115,0	0,0	7,1	0,1
C13	149,0	286,0	671,0	0,0	47,0	0,9
C14	110,0	207,7	510,5	0,0	32,4	0,7
C15	350,3	576,8	1715,4	0,0	117,7	3,4
C16	416,6	325,0	1705,6	0,0	117,0	3,4
C17	248,3	418,4	1293,3	0,0	80,7	2,2
C18	295,1	224,8	1287,8	0,0	80,4	2,2
C19	47,9	85,2	145,3	0,0	10,1	0,2
C20	40,6	61,9	115,4	0,0	7,1	0,1
C21	44,0	33,2	115,0	0,0	7,1	0,1
C22	149,0	286,0	671,0	0,0	47,0	0,9
C23	110,0	207,7	510,5	0,0	32,4	0,7
C24	350,3	576,8	1715,4	0,0	117,7	3,4

C25	416,6	325,0	1705,6	0,0	117,0	3,4
C26	248,3	418,4	1293,3	0,0	80,7	2,2
C27	295,1	224,8	1287,8	0,0	80,4	2,2

Agitadores

Todos os tanques agitados do modelo de usina a biogás foram dimensionados de acordo com Holland (1995) seguindo-se as seguintes dimensões exibidas na Figura A.3:

Figura A. 3 - Dimensões dotadas para os tanques do modelo.



Onde:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{H}{D_t} = 1$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{10}$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3}$$

A expressão utilizada para a determinação da potência dos agitadores empregados no modelo foi a equação descrita pela equação Eq. 8.

$$P = N_{PO} \rho N^3 D_a^5 \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

P= Potência do agitador

N_{PO} = Número de potência

ρ = Massa específica do fluido

N = Frequência de agitação

Da = Diâmetro do impelidor

A fim de reduzir a potência necessária à agitação dos tanques, optou-se por adicionar dois ou mais agitadores a um mesmo tanque dependendo do volume do mesmo, sendo aplicada a mesma metodologia de dimensionamento a cada impelidor, neste caso, o volume do tanque foi dividido pelo número de impelidores.

O número de potência N_{PO} foi selecionado de acordo com o impelidor do tipo turbina de quatro lâminas inclinadas para um regime de escoamento turbulento, sendo igual a 1,27.

A massa específica do fluido, ρ , variou em função da fração de sólidos de acordo com a equação Eq. 6.

A frequência de agitação foi determinada de acordo com a equação Eq. 9 a partir da velocidade tangencial do agitador, fixada em 2,5 m/s para todos os tanques, exceto para o tanque misturador ($v=3$ m/s).

$$N = \frac{2v}{\pi D_a} \quad \text{Eq. 9}$$

Com isso, os valores das potências de cada bomba e agitador para os cenários de usina a biogás são apresentados na Tabela A.2.

Tabela A. 2. Potências, em kWh/dia, das bombas e agitadores dimensionados para o modelo.

	Bombas						Agitadores		
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	Tq. Coletor	Misturador	Digestor
C1	47,91	85,26	145,29	0,00	10,05	0,16	4,26	0,41	149,59
C2	40,52	61,86	115,22	0,00	7,08	0,12	3,54	0,34	149,59
C3	43,84	33,39	114,68	0,00	7,03	0,12	3,88	0,34	149,59
C4	148,94	286,11	671,01	0,00	46,96	0,91	9,55	0,92	335,63
C5	109,79	207,55	509,67	0,00	32,38	0,65	7,95	0,76	335,63

C6	349,39	576,43	1712,66	0,00	117,43	3,37	15,23	1,47	535,56
C7	417,11	327,06	1708,68	0,00	117,25	3,38	16,71	1,47	535,56
C8	247,64	418,13	1291,22	0,00	80,54	2,14	12,68	1,21	535,56
C9	293,41	226,05	1283,68	0,00	80,04	2,14	13,89	1,21	535,56
C10	47,91	85,26	145,29	0,00	10,05	0,16	4,26	0,41	149,59
C11	40,52	61,86	115,22	0,00	7,08	0,12	3,54	0,34	149,59
C12	43,84	33,39	114,68	0,00	7,03	0,12	3,88	0,34	149,59
C13	148,94	286,11	671,01	0,00	46,96	0,91	9,55	0,92	335,63
C14	109,79	207,55	509,67	0,00	32,38	0,65	7,95	0,76	335,63
C15	349,39	576,43	1712,66	0,00	117,43	3,37	15,23	1,47	535,56
C16	417,11	327,06	1708,68	0,00	117,25	3,38	16,71	1,47	535,56
C17	247,64	418,13	1291,22	0,00	80,54	2,14	12,68	1,21	535,56
C18	293,41	226,05	1283,68	0,00	80,04	2,14	13,89	1,21	535,56
C19	47,91	85,26	145,29	0,00	10,05	0,16	4,26	0,41	149,59
C20	40,52	61,86	115,22	0,00	7,08	0,12	3,54	0,34	149,59
C21	43,84	33,39	114,68	0,00	7,03	0,12	3,88	0,34	149,59
C22	148,94	286,11	671,01	0,00	46,96	0,91	9,55	0,92	335,63
C23	109,79	207,55	509,67	0,00	32,38	0,65	7,95	0,76	335,63
C24	349,39	576,43	1712,66	0,00	117,43	3,37	15,23	1,47	535,56
C25	417,11	327,06	1708,68	0,00	117,25	3,38	16,71	1,47	535,56
C26	247,64	418,13	1291,22	0,00	80,54	2,14	12,68	1,21	535,56
C27	293,41	226,05	1283,68	0,00	80,04	2,14	13,89	1,21	535,56

Outros equipamentos elétricos

Transporte de rosca

O transporte de rosca foi dimensionado para transportar a palha moída para o topo do tanque misturador através da equação Eq. 9 (UFBA, 2022; CONVEYOR ENG. & MFG. CO, 2012).

$$P_{TR} = \frac{QH}{367} + C_0 \frac{QL}{367}$$

Onde:

P_{TR} = Potência do transportador de rosca

Q = Vazão de palha

H = Altura do transportador

L = Comprimento total do transportador

C₀ = Coeficiente de resistência ao transporte do material

A vazão de alimentação de palha Q variou de acordo com o cenário projetado. A altura H foi calculada através do volume do tanque misturador assumindo-se um tanque cilíndrico e adotando-se a proporção diâmetro/altura do tanque igual a 1. O comprimento do transportador foi determinado assumindo-se uma inclinação do equipamento de 20° ($\approx 0,7$ rad), assim $L=H/\text{sen}(0,7)$. O coeficiente de resistência ao transporte da palha foi extraído de Conveyor Eng. & Mfg. Co. (2012) sendo 1,6 para palha triturada. Assim, os valores de potência para a rosca transportadora em kWh/dia correspondente a cada cenário são apresentados na Tabela A.3.

Removedor de areia

O equipamento utilizado para a remoção de materiais inorgânicos como pedras e areia foi um hidrociclone. Seu dimensionamento foi realizado segundo a metodologia aplicada ao dimensionamento das bombas, porém utilizando-se as especificações de modelos de hidrociclone disponíveis no mercado. O critério para a seleção desses hidrociclones entre os modelos disponíveis no mercado foi sua capacidade em relação à vazão que correspondesse a vazão da bomba B3 para o respectivo cenário.

Demais equipamento elétricos

Todos os demais equipamentos elétricos tiveram sua potência de operação determinada a partir de catálogos de equipamentos disponíveis nos meios eletrônicos de consulta. Para isso, foram determinados os tempos diários de operação de cada equipamento e suas respectivas capacidades em cada cenário. A Tabela A.3 mostra os valores de potência para os equipamentos elétricos empregados o dimensionamento do modelo de usina a biogás em todos os cenários estudados.

Tabela A. 3. Potências, em kWh/dia, dos equipamentos elétricos dimensionados para o modelo.

	Outros equipamentos elétricos						
	Moinho	Rosca transportadora	Desumidificador	Compressor	Secador de tambor	Separador líq.-sól.	Desare-nador
C1	190,90	61,28	23,09	1,71	20,85	49,71	3,09
C2	145,65	42,50	17,94	1,33	14,59	37,29	2,85
C3	139,24	40,63	17,94	1,33	13,80	37,07	2,85
C4	641,57	308,48	77,59	5,74	70,08	167,05	6,87
C5	489,49	213,97	60,28	4,46	49,05	125,34	5,51
C6	1293,19	785,46	156,39	11,57	141,27	336,73	10,68
C7	1236,31	751,74	156,70	11,60	135,45	335,93	10,70
C8	986,65	544,81	121,50	8,99	98,87	252,65	9,10
C9	943,26	520,85	121,50	8,99	93,45	251,14	9,10
C10	190,90	61,28	23,09	1,71	20,85	49,71	3,09
C11	145,65	42,50	17,94	1,33	14,59	37,29	2,85
C12	139,24	40,63	17,94	1,33	13,80	37,07	2,85
C13	641,57	308,48	77,59	5,74	70,08	167,05	6,87
C14	489,49	213,97	60,28	4,46	49,05	125,34	5,51
C15	1293,19	785,46	156,39	11,57	141,27	336,73	10,68
C16	1236,31	751,74	156,70	11,60	135,45	335,93	10,70
C17	986,65	544,81	121,50	8,99	98,87	252,65	9,10
C18	943,26	520,85	121,50	8,99	93,45	251,14	9,10
C19	190,90	61,28	23,09	1,71	20,85	49,71	3,09
C20	145,65	42,50	17,94	1,33	14,59	37,29	2,85
C21	139,24	40,63	17,94	1,33	13,80	37,07	2,85
C22	641,57	308,48	77,59	5,74	70,08	167,05	6,87
C23	489,49	213,97	60,28	4,46	49,05	125,34	5,51
C24	1293,19	785,46	156,39	11,57	141,27	336,73	10,68
C25	1236,31	751,74	156,70	11,60	135,45	335,93	10,70
C26	986,65	544,81	121,50	8,99	98,87	252,65	9,10
C27	943,26	520,85	121,50	8,99	93,45	251,14	9,10

APÊNDICE B - Determinação da composição do biogás produzido na usina

A composição química do biogás foi estimada através da composição da alimentação do digestor, que varia de acordo com a proporção entre os co-substratos e o tipo de co-substrato. A composição elementar dos substratos aplicada no trabalho utilizou valores médios extraídos da literatura (QIANQIAN et al, 2022; WU et al, 2012 apud ASHRAF et al, 2021; YUAN et al, 2017 apud ASHRAF et al, 2021; ZHANG et al, 2019 apud ASHRAF et al, 2021; MAGLINAO et al, 2015 apud ASHRAF et al, 2021; QUAN et al, 2021; ZHANG et al, 2019; HU et al, 2022; OYEDEJI et al, 2022; CARPIO et al, 2022; TIANCHI et al, 2022; HE et al, 2021; NISAMANEENATE et al, 2020; CALVO et al, 2012; SINGH et al, 2022), que foram normalizados para uma base de 100% (entre os elementos analisados) para melhor comparação e são apresentados na Tabela B.1.

Tabela B. 1. Composição elementar dos co-substratos utilizados no modelo em %.

	Esterco bovino	Palha de milho	Palha de arroz
C	47,94	46,10	45,27
H	6,29	5,81	5,27
O	42,93	46,90	48,45
N	2,10	0,84	0,89
S	0,75	0,36	0,12

Para a determinação da composição elementar da matéria orgânica na corrente de alimentação do digestor, uma média ponderada pela proporção entre os co-substratos foi aplicada e o resultado para a proporção entre os elementos carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre foi utilizada para determinar a fórmula química de uma molécula teórica equivalente à matéria orgânica do substrato, cuja estrutura é $C_aH_bO_cN_dS_e$, onde:

a = número de mols carbono por mol

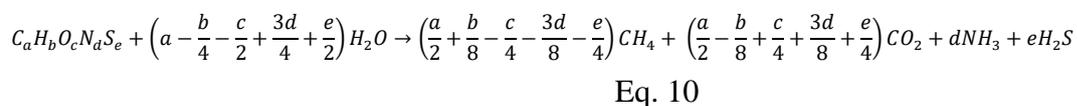
b = número de mols de hidrogênio por mol

c = número de mols de oxigênio por mol

d = número de mols de nitrogênio por mol

e = número de mols de enxofre por mol

A equação química que representa a digestão anaeróbia é escrita na forma da equação Eq. 10 (ACHINAS e EUVERINK, 2016; BUSWELL e HATFIELD, 1936).



Os valores das frações de metano obtidos com a metodologia para cada cenário são apresentados na Tabela B.2.

Tabela B. 2. Composição da alimentação do digestor, em percentual de massa seca, e a fração de metano no biogás resultante.

	Esterco	Palha de milho	Palha de arroz	% CH4
C1	70,09%	29,91%	-	51,12%
C2	70,00%	30,00%	-	51,11%
C3	73,45%	-	26,55%	51,49%
C4	70,09%	29,91%	-	51,08%
C5	70,00%	30,00%	-	51,11%
C6	70,09%	29,91%	-	51,08%
C7	73,58%	-	26,42%	51,62%
C8	70,00%	30,00%	-	51,11%
C9	73,45%	-	26,55%	51,49%
C10	70,09%	29,91%	-	51,12%
C11	70,00%	30,00%	-	51,11%
C12	73,45%	-	26,55%	51,49%
C13	70,09%	29,91%	-	51,08%
C14	70,00%	30,00%	-	51,11%
C15	70,09%	29,91%	-	51,08%
C16	73,58%	-	26,42%	51,62%
C17	70,00%	30,00%	-	51,11%
C18	73,45%	-	26,55%	51,49%
C19	70,09%	29,91%	-	51,12%
C20	70,00%	30,00%	-	51,11%

C21	73,45%	-	26,55%	51,49%
C22	70,09%	29,91%	-	51,08%
C23	70,00%	30,00%	-	51,11%
C24	70,09%	29,91%	-	51,08%
C25	73,58%	-	26,42%	51,62%
C26	70,00%	30,00%	-	51,11%
C27	73,45%	-	26,55%	51,49%

APÊNDICE C – Questionário: Operação de uma usina termelétrica a diesel na Amazônia

Sobre o processo

- 1) Qual a capacidade de geração elétrica da usina?
- 2) Qual o consumo de combustível da usina?
- 3) Quantos moto-geradores estão em funcionamento? Algum em stand-by?
- 4) Como é feito o abastecimento dos moto-geradores? O que é feito a partir do recebimento do diesel?
- 5) Qual a frequência de recebimento do combustível na usina?
- 6) Quais as atividades de manutenção periódica?

Sobre as pessoas

- 7) Quantos operadores trabalham na usina, incluindo todos os turnos?
- 8) Quais os cargos e funções dos operadores na usina?
- 9) Quais as funções dos cargos superiores? Há supervisores, coordenadores, diretores etc?
- 10) Qual a qualificação/escolaridade dos operadores e dos superiores?
- 11) Qual o regime de trabalho? Quantos dias de serviço e de folga por semana?

APÊNDICE D - Dados para o dimensionamento do quadro de funcionários de usina elétrica a biogás

Tabela D. 1. Características de tecnologias para coleta de esterco e estimativa de produtividade. * Operação: US\$ 10/h; Manutenção US\$ 20/h

	Custo de operação + Manutenção (US\$/dia)*	Tempo de manutenção semanal (h/semana)	Tempo de manutenção diário (h/dia)	Tempo de operação diário (h/dia)	Tempo de manutenção por animal (h/dia/vaca)	Tempo de operação por animal (h/dia/vaca)
Alley scraper	11,43	4	0,5714	0,0001	0,0003	0,0000
Skid loader	122,86	1	0,1429	12,0003	0,0001	0,0060

Fonte: Sanford, 2016

Tabela D. 2. Quantidade, distância percorrida até a planta e modal utilizado para transporte de substrato nos municípios de Aveiro, Prainha e Porto de Moz.

Aveiro			
	Massa (t/dia)	Distância (km)	Modal
Esterco	57,57	4,28	Rodoviário
Palha local	1,42	2,63	Rodoviário
Palha impo	4,13	117,42	Rodoviário
Prainha			
	Massa (t/dia)	Distância	Modal
Esterco	193,47	7,02	Rodoviário
Palha local	7,81	3,65	Rodoviário
Palha impo	10,85	129,38	Rodoviário
Porto de Moz			
	Massa (t/dia)	Distância	Modal
Esterco	389,98	15,05	Rodoviário
Palha local	0,61	1,56	Rodoviário
Palha impo	37,00	166,65	20% rodoviário + 80% fluvial

Tabela D. 3. Frequência de manutenção dos equipamentos empregados no projeto de usina elétrica a biogás.

Equipamento	Referência	Quantidade de equipamentos	Frequência de manutenção					
			Manute- nções/s emana	Manute- nções/ mês	Manute- nções/tr imestre	Manute- nções/s emestre	Manute- nções/a no	Manute- nções/ triênio
Motores elétricos	WEG, 2003	10	1	0	2	0	6	14
Sistemas hidráulicos	SPX FLOW, 2021A	8	4	8	0	0	8	10
Compressor	ZABATT, 2023	2	6	1	3	2	1	0

Motogerador	ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MATO GROSSO, 2023	1	0	0	0	17	24	0
Trocador de calor	SPX FLOW, 2021B	1	3	2	1	0	5	0

Tabela D. 4. Estimativa do número de trabalhadores dedicados a atividades de operação das usinas a biogás.

Setor	Atividades produção de biogás	Tempo dedicado a atividade por turno (h)	Turnos necessários/dia	Tempo necessário/dia	Número de trabalhadores considerando turnos de 8h diárias		
					Aveiro	Prainha	Porto de Moz
Alimentação	Descarregamento e armazenagem	2	3	6,0	0,7	0,7	0,7
Alimentação	Carregamento do moinho	2	3	6,0	0,8	0,8	0,8
Alimentação	Carregamento do mixer	1	3	3,0	0,4	0,4	0,4
Alimentação	Operação do hidrociclone	1	3	3,0	0,4	0,4	0,4
Equipamento	Operação do desumidificafor	2	3	6,0	0,7	0,7	0,7
Equipamento	Operação do gerador	2	3	6,0	0,8	0,8	0,8
Digestato	Operação do screw-press	4	3	12,0	1,5	1,5	1,5
Digestato	Operação do secador de tambor	4	3	12,0	1,5	1,5	1,5
Digestato	Acondicionamento do digestato	5	3	14,0	1,8	1,8	1,8
Administração	Financeiro/suprimentos	8	1	8,0	1,0	1,0	1,0
Administração	Recursos humanos	8	1	8,0	1,0	1,0	1,0
Administração	SSMA	8	1	8,0	1,0	1,0	1,0
Administração	Coordenação	8	1	8,0	1,0	1,0	1,0
Administração	Direção	8	1	8,0	1,0	1,0	1,0

APÊNDICE E - Resultados parciais para obtenção do IDH-T

Tabela E. 1. Índices sociais médios não-normalizados para cálculo de IDH-T em cada cenário do estudo.

	Otimista					
	Biogás			Diesel		
	Aveiro	Prainha	Porto de Moz	Aveiro	Prainha	Porto de Moz
Escolaridade média (anos)	12,01	11,84	11,64	12,13	12,02	12,32
Renda média (R\$/mês)	3574,59	3398,66	3195,77	3588,92	3400,71	3900,08
Taxa de acidentes (10 ⁻⁵)	1383,70	2379,70	3677,93	1413,47	1832,27	1859,37
	Pessimista					
	Biogás			Diesel		
	Aveiro	Prainha	Porto de Moz	Aveiro	Prainha	Porto de Moz
Escolaridade média (anos)	10,26	9,96	9,69	10,19	10,62	11,02
Renda média (R\$/mês)	1894,24	1773,03	1656,23	1789,44	1814,35	1943,71
Taxa de acidentes (10 ⁻⁵)	7798,26	8023,24	8383,43	1413,47	1832,27	1859,37

APÊNDICE F - Correlação para determinação do índice saúde

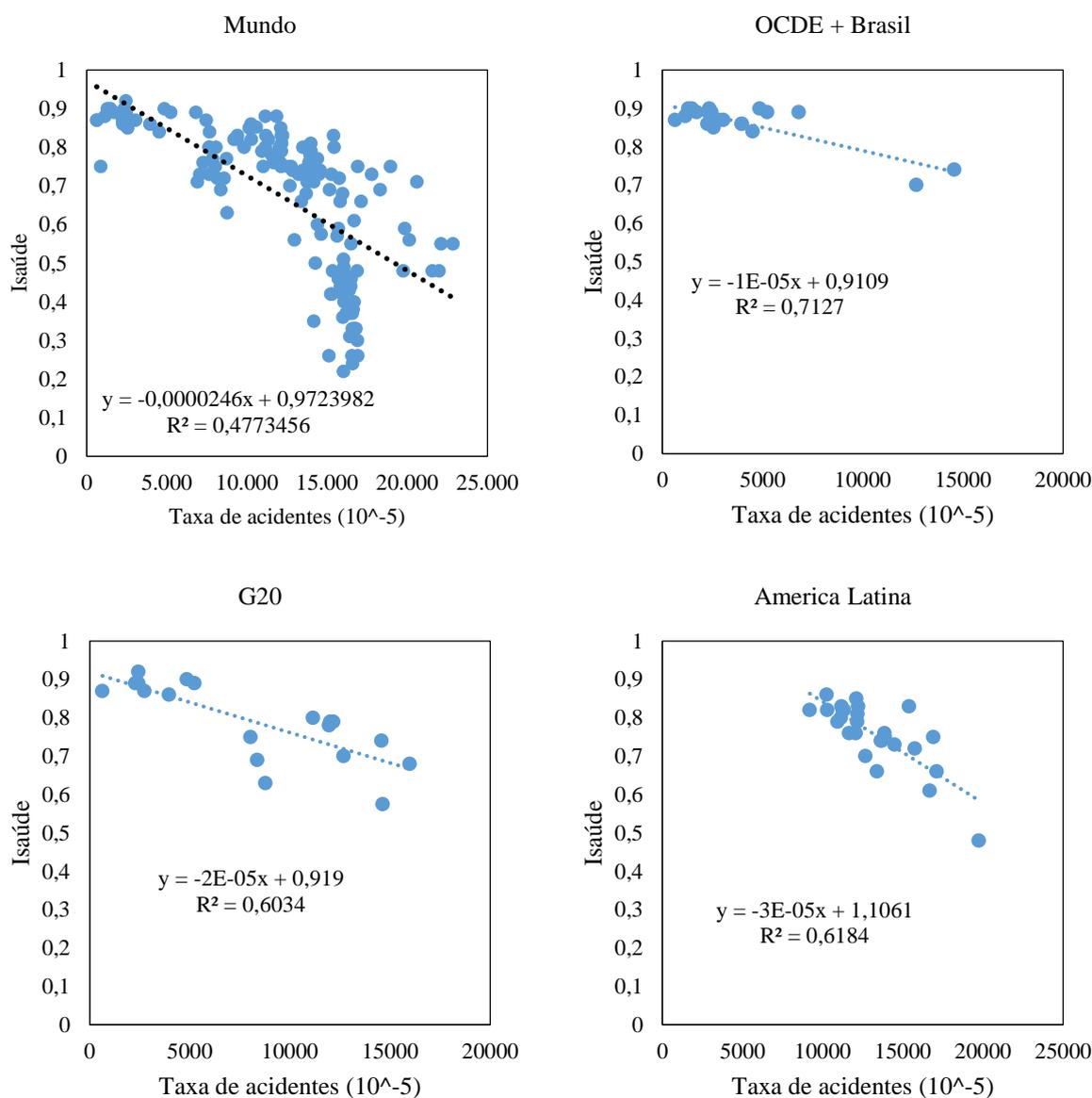


Figura F. 1. Correlações para a estimativa do índice saúde ($I_{saúde}$). Superior esquerda: relação do $I_{saúde}$ com a taxa de acidentes extraída de Souza et al (2021) contendo todos os países com dados disponíveis. Superior direita: correlação do $I_{saúde}$ com a taxa de acidentes para os países que compõe a OCDE + Brasil. Inferior esquerda: correlação do $I_{saúde}$ com a taxa de acidentes para os países do G20. Inferior direita: correlação do $I_{saúde}$ com a taxa de acidentes para os países da América latina.