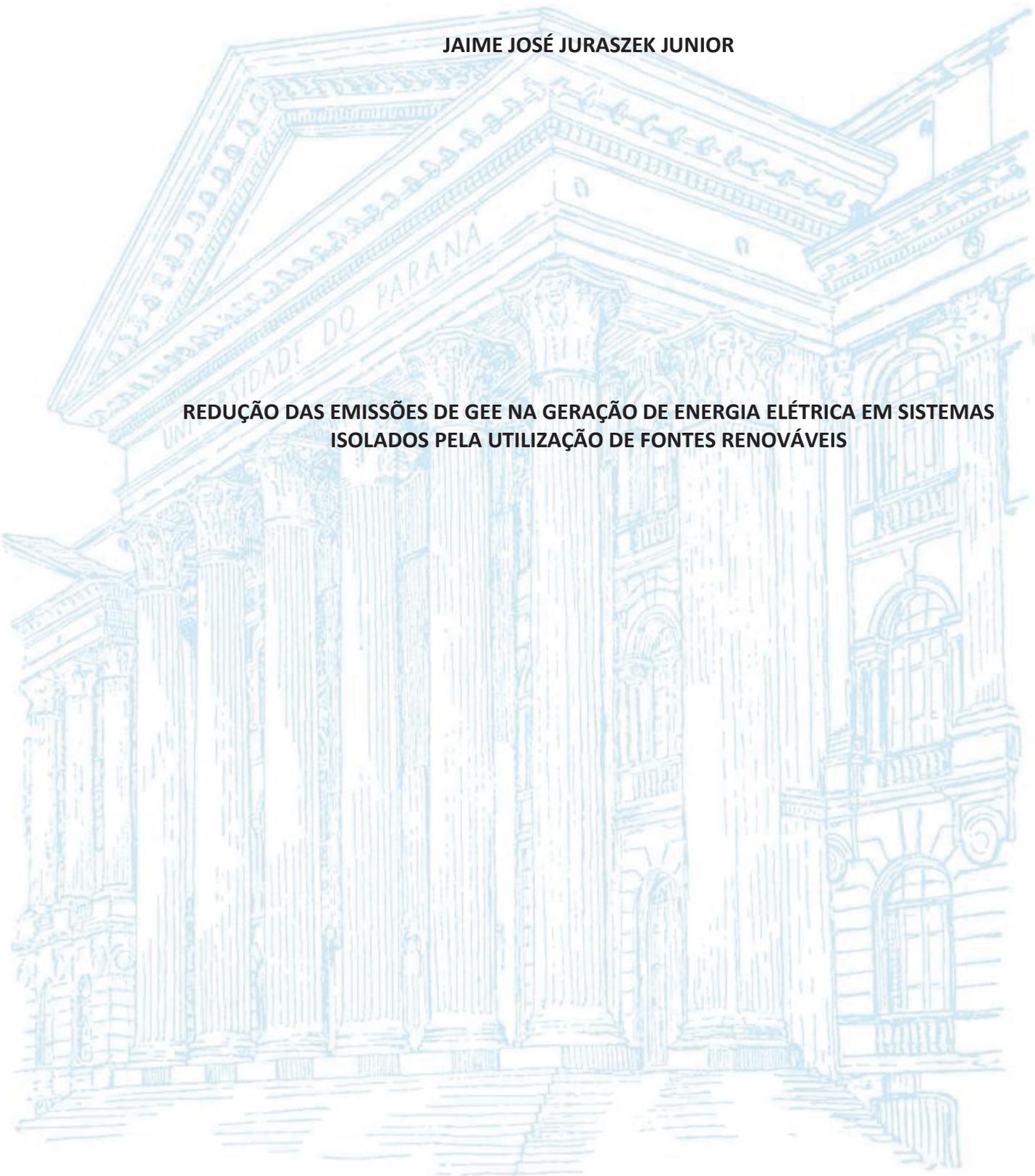


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JAIME JOSÉ JURASZEK JUNIOR



**REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS
ISOLADOS PELA UTILIZAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS**

**CURITIBA
2020**

JAIME JOSÉ JURASZEK JUNIOR

**REDUÇÃO DA EMISSÃO DE GEE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS
ISOLADOS PELA UTILIZAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS**

Artigo apresentado como requisito parcial à conclusão do Curso de MBA de Gestão Estratégica de Energias Renováveis e Biocombustíveis, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Marcelo Langer

**CURITIBA
2020**

Redução da emissão de GEE na geração de energia elétrica em Sistemas Isolados pela utilização de fontes renováveis

Jaime José Juraszek Junior

RESUMO

A transmissão e distribuição convencional do Sistema Integrado Nacional de energia elétrica (SIN) não são, nem técnica e nem economicamente, viáveis para atender comunidades isoladas, situadas no interior da Amazônia, em ilhas ou, ainda, em outros locais distantes dos grandes centros do território nacional. Características do território da Amazônia, por exemplo, como extensão, solos, áreas alagadas, vegetação exuberante, mantém o seu isolamento, restando às suas comunidades o atendimento por Sistemas Isolados que, geralmente, utilizam geradores movidos a óleo diesel, combustível proveniente de fonte não renovável e grande emissora de GEE - Gases de Efeito Estufa. Desta forma, a identificação da fonte de energia renovável mais adequada, bem como do processo de produção de combustível não poluente que permita a substituição, mesmo que parcial, da fonte fóssil, pode constituir a solução para diminuir sensivelmente as emissões de GEE na geração de energia elétrica dos Sistemas Isolados. Este trabalho tem como objetivo mostrar a redução das emissões de GEE nos Sistemas Isolados de geração de energia elétrica através da substituição gradual do óleo diesel pelo biogás de biomassa como combustível dos geradores, utilizando para isso 2 métodos de cálculo e 3 cenários de aplicação para a atual geração a diesel estimada pela EPE para estes Sistemas em 2020. No melhor cenário, com substituição de 100% do óleo diesel pelo biogás, apesar da maior quantidade de combustível necessário, a redução das emissões de GEE pela utilização do biogás é de 88% em relação ao uso do óleo diesel. Este resultado, claramente positivo em termos de redução das emissões de GEE, indica que a solução proposta deve ser considerada como uma boa alternativa para os Sistemas Isolados no planejamento do Governo Federal.

Palavras-chave: 1. GEE – Gases de Efeito Estufa. 2. Comunidades Isoladas 3. Sistemas Isolados. 4. Fontes Renováveis.

ABSTRACT

The conventional transmission and distribution of the National Integrated System of electricity (NIS) are neither technically nor economically feasible to serve isolated communities, those located in the interior of the Amazon, on islands or in other locations far from the great centers of the national territory. Characteristics of the territory of the Amazon, for example, such as extension, soils, wetlands, lush vegetation, maintain their isolation, leaving to their communities the assistance of Isolated Systems that generally use diesel-powered generators, fuel from a non-renewable source and a large GHG - Greenhouse Gases emitter, to generate electricity. Thus, identifying the most suitable renewable energy source as well as the non-polluting fuel production process that allows the substitution, even if it is only partially, of the fossil source may be the solution to reduce significantly GHG emissions in the generation of electricity from Isolated Systems. This work aims to show the reduction of GHG emissions in Isolated Electricity Generation Systems through the gradual replacement of diesel oil with biomass biogas as fuel for generators, using 2 calculation methods and 3 application scenarios for the current total diesel generation estimated by EPE for these Systems in 2020. In the best scenario, with the replacement of 100% of diesel oil by biogas, despite the greater amount of fuel needed, the reduction in GHG emissions from the use of biogas is 88% compared to the use of diesel oil. This clearly positive result in terms of reducing GHG emissions indicates that the proposed solution should be considered as a good alternative for Isolated Systems in the Federal Government's planning.

Key words: 1. GHG – Greenhouse Gases. 2. Isolated Communities. 3. Isolated Systems. 4. Renewable Sources.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	5
2.	OBJETIVO	7
3.	CONCEITOS E DEFINIÇÕES.....	7
3.1.	FONTES DE ENERGIA.....	7
3.2.	SISTEMAS ISOLADOS	8
4.	DIAGNÓSTICO DO PROBLEMA	9
5.	PROPOSTA DE SOLUÇÃO	11
5.1.	DEFINIÇÃO DA FONTE ENERGÉTICA	12
5.2.	A ESCOLHA DO PROCESSO/TECNOLOGIA	13
5.3.	ARMAZENAMENTO	16
6.	MATERIAIS E MÉTODOS	17
6.1.	METODOLOGIA E MODELO DE ANÁLISE	17
6.1.1.	MÉTODO 1	20
6.1.2.	MÉTODO 2	21
6.2.	CENÁRIOS DE ANÁLISE	23
7.	CÁLCULO DAS EMISSÕES	23
7.1.	CENÁRIO 1 (BASE): GERAÇÃO COM 100% DE ÓLEO DIESEL	23
7.1.1.	CÁLCULO DAS EMISSÕES DE GEE PELO MÉTODO 1	23
7.1.2.	CÁLCULO DAS EMISSÕES DE GEE PELO MÉTODO 2	24
7.2.	CENÁRIO 2: GERAÇÃO COM MIX DE 50% DE ÓLEO DIESEL E 50% DE BIOGÁS DE BIOMASSA	25
7.2.1.	CÁLCULO DAS EMISSÕES PELO MÉTODO 1.....	25
7.2.2.	CÁLCULO DAS EMISSÕES DE GEE PELO MÉTODO 2	26
7.3.	CENÁRIO 3: GERAÇÃO COM 100% DE BIOGÁS DE BIOMASSA	27
7.3.1.	CÁLCULO DAS EMISSÕES DE GEE PELO MÉTODO 1	27
7.3.2.	CÁLCULO DAS EMISSÕES DE GEE PELO MÉTODO 2	28
8.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
9.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	31
10.	AGRADECIMENTOS.....	33
	REFERÊNCIAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento humano depende do acesso à eletricidade, conceito que aborda questões críticas, importantes em todas as dimensões do desenvolvimento sustentável. Envolve uma ampla gama de impactos sociais e econômicos e a facilitação do desenvolvimento de atividades geradoras de emprego e renda e possibilitam o desenvolvimento socioeconômico das comunidades onde está presente.

Uma em cada sete pessoas em todo o mundo, ou 1 bilhão de pessoas (13% da população mundial), ainda não tem acesso à eletricidade e mais de 3 bilhões usam combustíveis poluentes até para cocção, afetando sua saúde e qualidade de vida pois o acesso à energia é essencial para reduzir a pobreza na medida em que possibilita os investimentos em inovações e novas indústrias, motores dos empregos, do crescimento inclusivo e da prosperidade compartilhada para economias inteiras (Banco Mundial, 2018).

No Brasil ainda existem cerca de 1 milhão de residências sem energia elétrica, notadamente em comunidades isoladas¹ das regiões Norte e Nordeste (ANEEL, 2017).

Além disso, mais de 3 milhões de pessoas são atendidas por Sistemas Isolados cuja geração de energia elétrica utiliza principalmente o óleo diesel.

Este cenário é reflexo da falta de viabilidade técnica e/ou econômica da construção de linhas de transmissão em regiões de baixa densidade demográfica, como o interior da Amazônia, o que impede que estas sejam interligadas ao SIN e, desta forma, que a energia mais limpa produzida nas principais hidrelétricas do país chegue até elas.

Como um exemplo da falta de interligação destas regiões ao SIN, pode-se citar a construção de grandes hidrelétricas na Região da Amazônia, onde o caso mais recente e emblemático é o da UHE² Belo Monte, a maior usina hidrelétrica brasileira, com capacidade

¹ **Comunidades Isoladas** aqui entendidas como aquelas que, independentemente de sua localização geográfica, normalmente em áreas longínquas dos grandes centros ou cidades, como as comunidades ribeirinhas e litorâneas, os ilhéus ou aquelas em locais de difícil acesso, como a Região da Amazônia, não possuem acesso ao Sistema Interligado Nacional (SIN) pois este demonstra-se técnica e economicamente inviável.

² **UHE** é a sigla para Usina Hidroelétrica, definida pela ANEEL como um aproveitamento hidrelétrico que possui as seguintes características: I - potência instalada superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 50.000 kW, desde que não sejam enquadrados como PCH e estejam sujeitos à outorga de autorização; II - potência instalada superior a 50.000 kW, sujeitos à outorga de concessão; e III - independente da potência instalada, tenham sido objeto de outorga de concessão ou de autorização ([Resolução Normativa ANEEL n. 875, de 10 de março de 2020 \(Diário Oficial, de 16 mar. 2020, seção 1, p. 60\)](#)).

instalada de 11.233 MW, cuja energia não chega às comunidades isoladas desta Região (EPE, 2018).

Sendo assim, essas comunidades arcam com os impactos ambientais destas construções sem usufruir do respectivo benefício do acesso à energia elétrica gerada por estas usinas e têm que se valer da geração de eletricidade local, através dos Sistemas Isolados³, geralmente à base de óleo diesel, fonte não renovável de energia, poluente e cara, ficando, em alguns casos, privadas do acesso em tempo integral a serviços básicos como iluminação e telecomunicações (televisão, telefonia e Internet) que, juntos com o saneamento básico, são fundamentais para o adequado desenvolvimento humano nos dias de hoje.

Além disso, a utilização de combustíveis fósseis provoca uma elevada emissão de gases de efeito estufa (GEE⁴) que causam o aquecimento do Planeta, com mudanças climáticas cada vez mais drásticas, evidenciadas por eventos geofísicos (terremotos, tsunamis e erupções vulcânicas), meteorológicos (tempestades severas), hidrológicos (inundações e deslizamentos) e climáticos (variações exageradas de temperaturas, com ondas de calor ou frio extremos, secas prolongadas, desertificação do solo e incêndios florestais) que não seguem o padrão histórico das últimas décadas e têm efeitos negativos sobre aspectos elementares da vida humana, tais como a qualidade da água, produção e distribuição de alimentos, proteção da saúde e integridade dos ecossistemas (FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV, 2019).

O Brasil, signatário do Acordo de Paris, se comprometeu em sua NDC⁵ à redução de 37% de suas emissões em 2025 (para todo o conjunto da economia), tendo como base as emissões de 2005. Especificamente no setor de energia, o texto da NDC brasileira apresenta contribuições indicativas para 2030 que incluem o aumento da participação das fontes renováveis na matriz energética e ganhos de eficiência (EPE, 2019).

³ **Sistemas Isolados** são definidos pelo Decreto n. 7.246/2010 como sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que, em sua configuração normal, não estejam eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional – SIN, por razões técnicas ou econômicas.

⁴ **Gases de Efeito Estufa** (GEE) são substâncias gasosas que absorvem parte da radiação infravermelha, emitida principalmente pela superfície terrestre, e dificultam seu escape para o espaço. Isso impede que ocorra uma perda demasiada de calor para o espaço, mantendo a Terra aquecida. Entretanto, o atual aumento descontrolado de suas emissões tem como consequência direta o indesejável aumento do aquecimento global, que provoca desequilíbrios e alterações climáticas no Planeta (Ministério do Meio Ambiente – MMA).

⁵ **NDC** é a Sigla em inglês para a expressão “Contribuição Nacionalmente Determinada” referente ao compromisso do Brasil em reduzir as emissões de gás carbônico em 37% em relação às emissões de 2005. A data limite para isso é 2025, com indicativo de reduzir 43% das emissões até 2030.

Dessa forma, afim de contribuir para o atingimento desta meta, é importante buscar alternativas de geração de energia elétrica, também para os Sistemas Isolados, no sentido de permitir a redução das emissões de GEE, contribuindo para diminuir o atual ritmo de elevação da temperatura média do Planeta, reduzindo os impactos oriundos da poluição do transporte, uso e armazenamento de óleo diesel, e, ainda, melhorando a qualidade do ar das comunidades onde estão instalados.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo demonstrar a redução da emissão de GEE na geração elétrica em Sistemas Isolados pela utilização de fontes renováveis, através da definição da fonte e do processo de produção do combustível alternativo e sua utilização em 2 cenários de substituição do óleo diesel.

3. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Neste item serão abordados dois conceitos relevantes para o propósito deste trabalho, fontes de energia e Sistemas Isolados.

3.1. Fontes de Energia

As diversas fontes de geração de energia se dividem em **renováveis** e **não renováveis**.

As **fontes renováveis** são consideradas infinitas ou inesgotáveis, pois suas quantidades se renovam constantemente ao serem usadas (Empresa de Planejamento Energético - EPE, 2018), podendo ser qualquer forma de energia solar, geofísica, ou de fontes biológicas, que são recompostas, por processos naturais, à uma taxa que é igual ou superior à taxa em que são consumidas (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA, 2019).

Entre as principais fontes renováveis de energia pode-se destacar a **hídrica** (energia potencial da queda da água dos rios), a **solar** (energia do sol), a **eólica** (energia do vento), a **biomassa** (energia de matéria orgânica), a **geotérmica** (energia do calor do interior da Terra), a **oceânica** (energia das marés e das ondas) e a do **hidrogênio** (energia química da molécula de hidrogênio).

As **fontes não renováveis** são finitas ou esgotáveis pois sua reposição na natureza demanda processos de longo período, milhões de anos sob condições específicas de temperatura e pressão, para sua reposição (EPE, 2018).

Entre as principais fontes não renováveis de energia pode-se destacar o **petróleo**, o **carvão mineral**, o **gás natural** e a **nuclear**.

Estas fontes são também conhecidas como fontes de energia convencionais porque formam a base firme de fornecimento de energia por não sofrerem com a intermitência de fornecimento característica de fontes renováveis como o sol e os ventos. Estas fontes compõem a maior parte da Matriz Energética mundial e do Brasil.

As fontes renováveis de energia são consideradas limpas, pois emitem menos GEE que as fontes fósseis.

Entretanto, deve-se destacar que tanto a produção de energia proveniente de fontes renováveis quanto aquelas provenientes de fontes não renováveis causam, em maior ou menor grau, impactos negativos sobre o Meio Ambiente, sendo que o que ocorre, em geral, é que os impactos causados pela utilização das fontes de energias renováveis são bem menores do que aqueles causados pela utilização das fontes não renováveis.

3.2. Sistemas Isolados

Sistemas Isolados são sistemas elétricos de serviço público de geração e distribuição de energia elétrica que não estão eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional, seja por razões técnicas ou por razões econômicas (Decreto n. 7.246/2010, BRASIL, 2010).

No Brasil são 272 localidades atendidas por Sistemas Isolados, através de 9 distribuidoras, sendo que 46 localidades têm previsão de interligação ao SIN até 2024 e outras 13 após esse período. A população total atendida por estes sistemas é superior a 3,3 milhões de pessoas, sendo de desde apenas 15 pessoas em Maici – RO até 365.000 habitantes em Boa Vista – RR, única capital não interligada ao SIN e que possui um grande potencial eólico ainda não explorado.

As demandas máximas previstas para os Sistemas Isolados em 2024 variam de 3,5 kW até cerca de 279 MW e a carga total estimada é de 529 MWmédio, o que representa apenas 0,7% da carga total do SIN, estimada para o mesmo ano em 81.931 MWmédio (EPE, 2019).

A maior parte dos Sistemas Isolados brasileiros encontra-se na região Norte, com destaque para o estado do Amazonas, com 95 sistemas (35%). As exceções são o estado do Mato Grosso, com apenas 1 localidade, e o estado de Pernambuco, também com 1 localidade, a ilha de Fernando de Noronha (EPE, 2019).

A Tabela 1 mostra a distribuição dos 272 Sistemas Isolados no Brasil em 8 estados e as respectivas populações atendidas:

TABELA 1 - QUANTIDADE DE SISTEMAS ISOLADOS POR UF E DISTRIBUIDORA.

Estado	Distribuidora	Número de Sistemas	População atendida
Acre	Energisa Acre	9	279.189
Amapá	Companhia de Eletricidade do Amapá	29	43.315
Amazonas	Amazonas Energia	95	1.549.241
Pará	Centrais Elétricas do Pará S.A.	23	678.694
	Petrobras BR	2	-
Rondônia	Energisa Rondônia	26	214.241
Roraima	Roraima Energia	86	541.712
Mato Grosso	Energisa Mato Grosso	1	3.038
Pernambuco	Companhia Energética de Pernambuco	1	3.021
TOTAIS		9	272
			3.312.451

FONTE: O autor, adaptado de EPE (2019).

4. DIAGNÓSTICO DO PROBLEMA

As usinas a óleo diesel deverão representar 94% da geração de energia elétrica nos Sistemas Isolados em 2020. A elevada participação do diesel faz com que a geração nestes Sistemas seja altamente intensiva em emissões, 2,764 milhões de tCO₂eq/ano, referentes ao consumo de 1.175.494 m³/ano de óleo diesel para a geração estimada de 4.228.396 MWh. Conforme mostrado na Tabela 3, apresentada no Item 6 – Materiais e Métodos, são estimados para 2020 cerca de 2,86 milhões de toneladas de CO₂ equivalente para a geração de 4.507.587

MWh nos Sistemas Isolados (EPE, 2019), número que é 2,7% menor que o estimado para 2019, apesar da maior demanda de energia elétrica para 2020. Essa redução é possível devido à entrada nos Sistemas Isolados da operação de usinas a gás natural e PCHs, redução que pode ser ainda maior em 2021 pelas usinas contratadas no Leilão de Boa Vista e aumentar gradualmente pela utilização crescente de fontes renováveis em substituição às fontes fósseis como o óleo diesel (EPE, 2019).

Entretanto, a utilização de fontes renováveis como o vento, para a geração de energia eólica, e a radiação solar, para a geração de energia fotovoltaica, duas opções atualmente muito utilizadas, são mais frequentemente dependentes das condições técnicas, geográficas e climáticas de cada local que a biomassa e, devido às suas condições de intermitência, estas fontes e suas tecnologias de geração não garantem o fornecimento contínuo pois não geram energia à noite (geração fotovoltaica) e em dias com pouco vento (geração eólica).

Assim, devem ser aplicadas de forma complementar à geração de energia de base, surgindo daí a necessidade de sua combinação com uma fonte de fornecimento contínuo para geração que, usualmente, provém de fonte hidráulica (em condições hidrológicas normais) ou fonte fóssil para a geração térmica, complementar à geração hidráulica quando necessário.

Entre as fontes mais conhecidas e utilizadas para a geração de energia de base, destacam-se as águas dos rios, que geram a energia hidráulica, e o óleo diesel, o gás natural e o carvão mineral e vegetal e, ainda, a biomassa (principalmente a cana de açúcar), que geram a energia térmica.

O problema da utilização destas fontes é que, no caso da geração de energia hidráulica, que apresenta baixa geração de GEE e baixo custo operacional, o custo e o prazo de implantação são altos, mesmo que se trate de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH⁶) que, dependendo de seu porte e localização, apesar de poder ser construída em 18 meses (ROBLEÑO, 2010), demanda, em média, 6 anos para o início das obras, tempo dispendido com aprovações de Projetos, obtenção de licenças e autorizações para a construção. Além disso, dependendo de seu porte, podem causar importantes impactos ambientais ao alagarem grandes áreas para a formação de seus reservatórios.

⁶ Uma Pequena Central Hidrelétrica (**PCH**) é uma usina de pequeno porte que produz energia elétrica utilizando-se das águas do rio. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), para ser considerada uma **PCH** a usina deve ter uma potência instalada entre 1 MW e 30 MW.

Já as usinas de geração de energia que utilizam o óleo diesel, o gás natural ou o carvão mineral, apresentam altos custos de operação, devido ao preço do insumo, ao custo de seu transporte até as usinas e, principalmente, altos impactos ambientais devido à elevada geração de GEE, no caso do óleo diesel e carvão mineral, cujas utilizações provocam fortes impactos negativos sobre aspectos elementares da vida humana devido ao aquecimento do Planeta e consequente ocorrência de mudanças climáticas, cada vez mais fortes e evidentes, conforme já detalhado na introdução deste trabalho.

5. PROPOSTA DE SOLUÇÃO

A proposta de solução, objetivando a redução da emissão de GEE, é a determinação de uma alternativa à utilização do óleo diesel para a geração contínua de energia elétrica nos Sistemas Isolados.

Para tanto, deve-se definir uma fonte renovável, que deve estar disponível localmente, e o processo/tecnologia de produção do combustível, que deve ser armazenável.

Neste processo de definição da fonte e respectivo processo de produção de combustível deve-se sempre considerar opções que sejam técnica, econômica e ambientalmente viáveis para que a respectiva geração de energia seja sustentável e justificável na substituição do óleo diesel.

A escolha da fonte renovável deve considerar, portanto, o tipo de vegetação, clima, insolação, regime de ventos, topografia, entre outros aspectos relevantes, específicos do local onde o Sistema Isolado em questão está localizado.

O potencial energético da biomassa residual proveniente de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira, por exemplo, apenas nos municípios atendidos pelos Sistemas Isolados, é de 2,5 GW, sendo que 40% (398 MW) do atual parque instalado destes Sistemas (996 MW) poderiam, segundo a EPE, ser atendidos com UTE's a biomassa, caso em que o País economizaria divisas da ordem de R\$1 Bilhão por ano com importação de óleo diesel (EPE, 2018).

Utilizando como exemplo o caso específico da Região da Amazônia, deve-se aproveitar a abundância de seus recursos naturais e buscar uma fonte que possa ser explorada e utilizada de forma sustentável, sem causar impactos negativos no meio ambiente em que estão

inseridas e, ainda, que possam gerar um combustível que seja armazenável, condição essencial para permitir a produção contínua de energia elétrica.

Nesta situação podemos identificar a biomassa⁷, que é uma das maiores fontes renováveis de energia disponível nas áreas rurais e agroindustriais e cuja digestão anaeróbica produz o biogás⁸. Por sua vez, o biogás produzido apresenta a necessária característica de ser armazenável, o que permite a sua utilização contínua na produção de energia elétrica.

Como o biogás é um recurso controlável, o aprimoramento do seu processo de produção e a consolidação da sua utilização para geração termelétrica poderia agregar benefícios significativos para o Sistema Elétrico, particularmente na Geração Distribuída (GD)⁹ dos Sistemas Isolados. Neste sentido, pode-se destacar o crescimento do arcabouço legal, em âmbito nacional e estadual, com o objetivo de incentivar o uso do biogás para esse fim (EPE, 2019).

Além disso, o biogás é classificado como um biocombustível avançado e com balanço negativo de carbono sendo, portanto, uma fonte mitigadora de emissões de GEE (ENVIRONMENTAL PROTECT AGENCY – EPA/USA, 2017).

5.1. Definição da Fonte Energética

Na Região da Amazônia, tomada como exemplo, a solução proposta passa pela utilização de biomassa residual, proveniente da trituração de plantas aquáticas, que são abundantes nesta Região e podem ser cultivadas de forma sustentável, para servir de matéria-prima na produção, em escala adequada, de biogás que, devidamente armazenado, pode substituir a utilização do óleo diesel na alimentação dos geradores para a produção de energia elétrica dos Sistema Isolados localizados nesta Região.

⁷ **Biomassa** é qualquer material capaz de ser decomposto por ação biológica. É um recurso renovável que provém da massa total de matéria-orgânica que se acumula em um espaço, pertencendo a ela todas as plantas, animais e resíduos. A biomassa pode ser encontrada de diversas formas onde as mais conhecidas são a lenha e os resíduos gerados pelas culturas agrícolas, agroindústrias, criação animal, florestas energéticas e resíduos sólidos municipais (Fernandes, 2012).

⁸ **Biogás** é o nome comum dado a uma mistura de gases que foi produzida pela decomposição biológica da matéria orgânica na ausência de oxigênio. Normalmente consiste em uma mistura gasosa composta principalmente de gás metano e gás carbônico, com pequenas quantidades de gás sulfídrico e umidade.

⁹ **Geração Distribuída (GD)** é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es), independente da potência, tecnologia e fonte de energia.

A proliferação de macrófitas é tão exuberante e abundante na Amazônia que a sua presença nos mananciais chega a ser considerada nociva. Além disso, as macrófitas a se utilizar como matéria-prima para biodigestão proposta no presente trabalho não seriam as selvagens ou as de crescimento espontâneo, mas macrófitas cultivadas de forma sustentável em tanques-rede, com cargas programadas de acordo com a demanda de biogás a produzir no biodigestor, de acordo com a demanda energética (BLEY JUNIOR, 2019).

5.2. A Escolha do Processo/Tecnologia

Existem diversas tecnologias para a produção de biogás a partir de biomassa. Os biodigestores¹⁰, onde ocorre o processo de biodigestão¹¹, constituem a tecnologia utilizada em propriedades rurais como uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável, aproveitando os coprodutos rurais, efluentes industriais e urbanos como fontes renováveis e sustentáveis de geração de energia (BARBOSA; LANGER, 2011).

Assim, a biodigestão é um processo/tecnologia que pode gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos, pois a eliminação de resíduos dispostos de modo irregular diminui a contaminação da água, do solo e do ar. Evita o contato humano com os resíduos, a proliferação de pragas e outras doenças correlacionadas à falta de saneamento básico e, ainda, permite a geração de energia e produção de biofertilizante trazem também benefícios econômicos, pois com destinação e processamento adequados, a biomassa pode ser convertida em biogás e em biocombustíveis por meio de diferentes tecnologias e, como fontes renováveis e sustentáveis de energia, podem gerar energia térmica, mecânica e elétrica (BARBOSA; LANGER, 2011).

Nas comunidades isoladas da Região da Amazônia, a tecnologia mais comum e acessível na obtenção de biogás para utilização em seus Sistemas Isolados é a da biodigestão anaeróbica. A matéria-prima a ser digerida será composta pelas macrófitas aquáticas.

¹⁰ **Biodigestores** são constituídos por um compartimento fechado no qual ocorre a decomposição de matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo biogás e biofertilizante. Os materiais orgânicos utilizados no biodigestor podem ser os resíduos de produção vegetal (folhas, palhas, restos de cultura), de produção animal (como esterco e urina), de atividades humanas (fezes, urina, lixo doméstico) e, ainda, resíduos industriais.

¹¹ **Biodigestão** ou fermentação anaeróbica é um método de reciclagem que consiste na produção de gás combustível e também de adubos, a partir de compostos orgânicos (geralmente excrementos de herbívoros, restos de frutas e vegetais). Realizada por bactérias que existem livres na natureza é considerada um processo alternativo de produção energética renovável e, principalmente, uma maneira de eliminação dos resíduos orgânicos urbanos.

Após cultivadas e colhidas, as macrófitas devem ser processadas em moinhos, com vistas a redução da sua granulometria, etapa essencial para se obter a biodigestão de tecidos vegetais resistentes à degradação como são os tecidos destas espécies.

Após a sua moagem, a matéria-prima deve ser submetida, ainda, a um período de silagem, que pode durar de 45 a 90 dias, misturadas à razão de 15% aos líquidos disponíveis, que podem ser os esgotos domiciliares comuns produzidos nestas comunidades ou mesmo águas livres, para que se processe a sua hidrólise¹² forçada prévia, antes de iniciar a sua digestão anaeróbia.

A digestão ocorrerá em um biodigestor que é, basicamente, uma câmara fechada onde a biomassa é fermentada anaerobicamente, isto é, sofre a digestão por micro-organismos anaeróbios, resultando deste processo o biogás, que é canalizado para ser utilizado como fonte de energia, e sobras, que podem ser utilizadas como fertilizante.

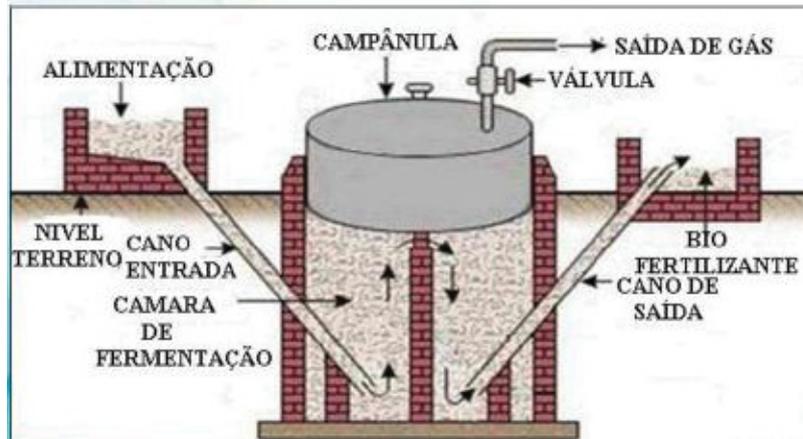
O biodigestor pode ser construído de alvenaria, concreto ou outros materiais e o modelo mais indicado para a presente proposta é o do biorreator ou biodigestor vertical modelo indiano (Figura 1), de escoamento contínuo, com a produção e alimentação contínua de biomassa residual, permitindo a produção constante de biogás.

Ele deve ser dotado de sistema de agitação interna e não necessita de mecanismo de aquecimento interno devido às altas temperaturas da Região da Amazônia e pelo material homogêneo que se pretende usar como matéria-prima.

Dessa forma, o biodigestor produzirá biogás e, após o consumo total do metano que gera o biogás, a sobra da matéria-prima livre de gases poderá, ainda, ser utilizada como biofertilizante.

¹² **Hidrólise** (do grego hidro-, água, e -lysis, separação) é uma reação química de quebra de ligação de uma molécula com a adição de uma molécula de água (AULETE, 2019). A hidrólise é uma reação química em meio aquoso, em que a água sofre dupla decomposição em um composto, e é um processo que geralmente se mostra eficiente na solubilização de proteínas. (HIJAZIN; SIMÕES; SILVEIRA, 2016).

FIGURA 1 – MODELO DE BIODIGESTOR INDIANO



FONTE: Oliver et al., 2008.

O gás bruto resultante do processo de digestão anaeróbia (biodigestão) é chamado de biogás, uma mistura de gases, contendo o metano (CH_4) como principal constituinte (de 50 a 75%), em segundo lugar vem o dióxido de carbono (CO_2), com 25 a 45% de concentração; vapor de água (2 a 7 %) e traços de nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2) e gás sulfídrico (H_2S), conforme detalhado na Tabela 2 (FNR, 2009).

TABELA 2 – COMPOSIÇÃO MÉDIA DO BIOGÁS.

Gás	%
Metano (CH_4)	40 - 75
Dióxido de Carbono (CO_2)	25 - 40
Nitrogênio (N)	0,5 - 2,5
Oxigênio (O_2)	0,1 - 1
Ácido Sulfídrico (H_2S)	0,1 - 0,5
Amoníaco (NH_3)	0,1 - 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 - 0,1
Hidrogênio (H)	1 - 3

FONTE: O autor, adaptado de Castañon (2002).

O biogás é um combustível adequado para a geração de energia elétrica e diversas tecnologias estão disponíveis, sendo as principais aplicações em geradores com combustão interna, em motores do ciclo Otto ou Diesel e as turbinas a gás (LANTZ, 2004).

A conversão energética do biogás em energia elétrica acontece através dos geradores que transformam, através de um processo de combustão controlada, a energia química contida em suas moléculas em energia mecânica que, por sua vez, movimenta um gerador que a converte em energia elétrica (COELHO et al., 2006).

A utilização de biogás em sistemas de combustão interna para a geração de eletricidade é uma tecnologia bem estabelecida e extremamente confiável. Milhares de equipamentos são operados em estações de tratamento de efluentes, aterros e plantas de biogás. O tamanho dos equipamentos varia de 12 kW em pequenas fazendas a até vários MW em grandes aterros (IEA, 2005).

5.3. Armazenamento

Uma das características dos combustíveis gasosos é a possibilidade de seu armazenamento pois a sua energia permanece armazenada, na forma de biogás ou biometano, da mesma forma que na hidroeletricidade a energia permanece armazenada na água acumulada nos seus reservatórios.

Esta característica é que credencia o biogás como uma “bateria biológica”, capaz de suprir as deficiências de geração causadas pela intermitência de longo prazo de fontes alternativas como a solar ou a eólica e substituir, adequadamente, o óleo diesel na geração de energia firme.

Por intermitência de longo prazo entende-se, por exemplo, os períodos noturnos, quando os painéis solares não produzem, ou períodos com pouco vento, quando os aerogeradores tampouco produzem. Embora já seja possível o armazenamento da energia gerada por estas fontes, através de acumuladores de calor ou bancos de baterias de grande porte, tecnologias ainda inviáveis devido a serem excessivamente caros.

Na falta destas fontes, apenas outras que sejam armazenáveis de forma mais convencional e econômica, como o óleo diesel ou o biogás, podem garantir o despacho de energia nos períodos de longa intermitência.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Metodologia e Modelo de Análise

Embora existam várias ferramentas para o cálculo da redução da emissão de GEE, entre as quais pode-se destacar aquela desenvolvida pela Fundação Getúlio Vargas para aplicação pelo BNDES no enquadramento de projetos financiados com recursos do programa Fundo Clima¹³, sua aplicação no presente trabalho exigiria uma abordagem e tratamento de dados com um grau de complexidade que não se aplica ao formato e à sua proposta.

Dessa forma, para demonstrar o benefício da substituição do óleo diesel pelo biogás na geração de energia elétrica em Sistemas Isolados, serão considerados os valores dos fatores de emissão de GEE (tCO₂eq/MWh) referentes às fontes óleo diesel e biomassa da Tabela 3, apresentados no trabalho “Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2024 – Ciclo 2019” (EPE, 2019).

TABELA 3 – EMISSÕES ESTIMADAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NOS SISTEMAS ISOLADOS EM 2020.

Fonte	Geração Estimada (MWh/ano)	Consumo de Combustível	Emissões (MtCO ₂ eq/ano)
Óleo Diesel (Demanda OD)	4.228.396	1.175.494 m ³ /ano	2,764
Gás Natural	165.232	44.612.585 m ³ /ano	0,092
Biomassa	52.560	142.800 ton/ano	0,004
Fotovoltaica	6.555	-	-
PCH	54.844	-	-
TOTAIS	4.507.587		2,860

FONTE: O autor, adaptado de EPE, 2019.

¹³ O **Fundo Clima** foi criado pela Lei nº 12.114/2009 e regulamentado pelo Decreto nº 7.343/2010. Representa um instrumento da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída pela Lei nº 12.187/2009. Ele tem por finalidade financiar projetos, estudos e empreendimentos que visem à mitigação (ou seja, à redução dos impactos) da mudança do clima e à adaptação a seus efeitos.

Serão estimadas as emissões de GEE em tCO₂eq/MWh em 3 cenários de utilização do óleo diesel e do biogás: (i) 100% óleo diesel, (ii) 50% óleo diesel / 50% biogás e (iii) 100% biogás, levando em conta os seus respectivos poderes caloríficos e fatores de emissão para a geração de energia elétrica, considerando, também por simplificação, que o fator de emissão do biogás de biomassa seja equivalente ao da própria biomassa, dado disponível no já citado trabalho da EPE.

É igualmente relevante destacar e demonstrar que, para a geração da mesma quantidade de energia elétrica, apesar do óleo diesel ter maior poder calorífico e, por consequência, maior rendimento energético e menor consumo unitário que o biogás, ainda assim o balanço final de emissões de GEE é sensivelmente favorável ao uso do biogás devido à sua emissão de GEE ser muito menor que a do óleo diesel.

As tabelas e informações a seguir apresentam valores e relações que serão utilizadas nos cálculos comparativos de emissões no item 7 deste trabalho.

Tabela 4 traz a equivalência entre 1 m³ de biogás e outras fontes energéticas, entre as quais o óleo diesel (POMPERMAYER, 2000).

TABELA 4 – EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA ENTRE 1 M³ DE BIOGÁS E OUTRAS FONTES.

Fonte	Faixa
Gasolina (L)	0,61 - 0,70
Querosene (L)	0,58 - 0,62
Óleo Diesel (L)	0,55
GLP (kg)	0,40 - 1,43
Álcool (L)	0,80
Carvão Mineral (kg)	0,74
Lenha (kg)	3,50
Eletricidade (kWh)	1,25 - 1,43

FONTE: O autor, adaptado de POMPERMAYER (2000).

A Tabela 5 traz os limites de consumo específico de óleo diesel por potência instalada em Usinas Termelétrica – UTEs, movidas por motores de combustão interna, definidos pela Resolução Normativa nº. 427 da ANEEL, de 2011. Para os cálculos de determinação da emissão de GEE deste trabalho será considerado um gerador na faixa de potência de 1 a 100 kW, com o consumo específico de 0,404 l/kWh (Tabela 5, ANEEL, 2011).

Para um gerador com 75 kW de potência, o consumo específico de diesel será de 0,404 l/kWh, utilizando o limite determinado pela RN nº. 427/2011 da ANEEL. Para geradores de maior porte, a partir de 10.000 kW este consumo cai para, no máximo, 0,253 l/kWh (ANEEL, 2011). Já o consumo específico de biogás de um grupo gerador na mesma faixa, também com potência de 75 kW, é de 50 m³/h, ou seja, 50 m³ para gerar 75 kWh (VENDRAME, 2015).

TABELA 5 – LIMITES DE CONSUMO ESPECÍFICO POR POTÊNCIA INSTALADAS EM UTEs BASEADAS EM MCI - MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.

POTÊNCIA (Kw)		Limite de Consumo Específico (l/kWh)
de	a	
1	100	0,404
101	250	0,349
251	500	0,329
501	750	0,296
751	1000	0,289
1001	2500	0,289
2501	5000	0,283
5001	7500	0,283
7501	10000	0,283
10001	12500	0,253
12501	15000	0,253
15001	20000	0,253
20001	acima	0,210

FONTE: O autor, adaptado de Anexo da Resolução Normativa nº. 427 ANEEL (2011), 2020.

A densidade do óleo diesel considerada nos cálculos da emissão de GEE deste trabalho é de 0,853 kg/l (ZERBINI, 2019) e a do biogás é de 1,15 kg/m³ (ADENE/INETI, 2001).

6.1.1. Método 1

Este método calcula a emissão anual total (kgCO₂ eq./ano) pela determinação da emissão unitária (kgCO₂ eq./kg) a partir da emissão específica (kgCO₂ eq./MWh) e do consumo unitário (kg/MWh), utilizando as equações da Tabela 6 e os parâmetros da Tabela 7.

TABELA 6 – EQUAÇÕES UTILIZADAS NO CALCULO DE EMISSÕES PELO METODO 1.

EQ	FÓRMULA	PARÂMETROS
1	Consumo Unitario de óleo diesel em kg/kWh : $C_{UN \text{ óleo diesel}} = C_e \text{ óleo diesel} \times D \text{ óleo diesel}$	$C_e \text{ óleo diesel}$: consumo específico de óleo diesel l/kWh $D \text{ óleo diesel}$: densidade do óleo diesel kg/l
2	Consumo Unitario de biogás em kg/kWh : $C_{UN \text{ biogás}} = C_e \text{ biogás} \times D \text{ biogás}$	$C_e \text{ biogás}$: consumo específico de biogás m³/kWh $D \text{ biogás}$: densidade do biogás kg/m³
3	Emissão Específica óleo diesel kg.CO₂.eq./MWh : $EE \text{ óleo diesel} = CE_{eq \text{ óleo diesel}} \div DA_{SI \text{ óleo diesel}}$	$CE_{eq \text{ óleo diesel}}$: coef. emissão equiv. diesel kg.CO₂.eq./ano $DA_{SI \text{ óleo diesel}}$: demanda anual S.I. c/diesel MWh/ano
4	Emissão Específica do biogás kg.CO₂.eq./MWh : $EE \text{ biogás} = CE_{eq \text{ biogás}} \div DA_{SI \text{ biogás}}$	$CE_{eq \text{ biogás}}$: coef. emissão equiv. biogás kg.CO₂.eq./ano $DA_{SI \text{ biogás}}$: demanda anual S.I. c/ biogás MWh/ano
5	Emissão Unitária do óleo diesel kg.CO₂.eq/kg : $E_{unit. \text{ óleo diesel}} = EE \text{ óleo diesel} \div C_{UN \text{ óleo diesel}}$	$EE \text{ óleo diesel}$: emissão específica diesel kg.CO₂.eq./MWh $C_{UN \text{ óleo diesel}}$: consumo unitário de óleo diesel kg/kWh
6	Emissão Unitária do biogás em kg.CO₂.eq/kg : $E_{unit. \text{ biogás}} = EE \text{ biogás} \div C_{UN \text{ biogás}}$	$EE \text{ biogás}$: emissão específica biogás kg.CO₂.eq./MWh $C_{UN \text{ biogás}}$: consumo unitário de biogás kg/kWh
7	Quantidade de óleo diesel em kg/ano : $Q \text{ óleo diesel} = C_{UN \text{ óleo diesel}} \times DA_{SI \text{ óleo diesel}}$	$C_{UN \text{ óleo diesel}}$: consumo unitário de óleo diesel kg/MWh $DA_{SI \text{ óleo diesel}}$: demanda anual gerada c diesel MWh/ano
8	Quantidade de biogás em kg/ano : $Q \text{ biogás} = C_{UN \text{ biogás}} \times DA_{SI \text{ biogás}}$	$C_{UN \text{ biogás}}$: consumo unitário de biogás kg/MWh $DA_{SI \text{ biogás}}$: demanda anual gerada c/ biogás MWh/ano
9	Emissão Tot. Anual geração diesel kg.CO₂.eq/ano : $E_{TOT ANUAL \text{ óleo diesel}} = E_{unit. \text{ óleo diesel}} \times Q \text{ óleo diesel}$	$E_{unit. \text{ óleo diesel}}$: emissão unitária óleo diesel kg.CO₂.eq/kg $Q \text{ óleo diesel}$: quantidade de óleo diesel kg/ano
10	Emissão Tot. Anual geraç. biogás kg.CO₂.eq/ano : $E_{TOT ANUAL \text{ biogás}} = E_{unit. \text{ biogás}} \times Q \text{ biogás}$	$E_{unit. \text{ biogás}}$: emissão unitária do biogás kg.CO₂.eq/kg $Q \text{ biogás}$: quantidade de biogás kg/ano

FONTE: O autor, 2020.

TABELA 7 – PARÂMETROS E INDICADORES UTILIZADOS NOS CALCULOS PELO METODO 1.

N	PARÂMETRO	ÓLEO DIESEL	FONTE	BIOGÁS	FONTE
1	C_e - Consumo Específico l/kWh (diesel) m ³ /kWh (biogás)	0,404	ANEEL	0,667	VENDRAME
2	D - Densidade em kg/l (óleo diesel) e Kg/m ³ (biogás)	0,853	ZERBINI	1,15	ADENE/ INETI
3	CE_{eq} – Coefic. de Emissão equiv., Mt.CO ₂ .eq./ano	2,764	EPE	0,004	EPE
4	DA_{SI} - Demanda Anual. Sist. Isol. em 2020, MW/ano	4.228.396	EPE	52.560	EPE
5	EE - Emissão Específica em kg.CO ₂ .eq./MWh	653,7	calculado	76,1	calculado
6	C_{UN} - Consumo unitário em kg/MWh	345	calculado	767	calculado
7	E_{unit.} - Emissão unitária em kg.CO ₂ .eq./kg	1,895	calculado	0,099	calculado
8	Q – Quant. de combust. para gerar a DT _{SI} , em kg/ano	calculado de acordo com o cenário			
9	E_{TOT ANUAL} – Emis. tot. anual geração kg.CO ₂ .eq/ano	calculado de acordo com o cenário			
10	Rel. Consumo biogás/óleo diesel – Rel. comparat. consumo	calculado de acordo com o cenário			
11	Rel. Emissão óleo diesel/biogás – Rel. comparat. emissão	calculado de acordo com o cenário			

FONTES: Citadas, elaboração do autor, 2020.

6.1.2. Método 2

Este método calcula a emissão anual total (kgCO₂ eq./ano) diretamente a partir do coeficiente de emissão equivalente de cada fonte (kgCO₂ eq./MWh) e a demanda total anual de energia elétrica estimados pela EPE previstas para 2020 para os Sistemas Isolados (EPE,2019), utilizando as equações da Tabela 8 e os parâmetros da Tabela 9.

TABELA 8 – EQUAÇÕES UTILIZADAS NO CALCULO DE EMISSÕES PELO METODO 2.

EQ	FÓRMULA	PARÂMETROS
11	Emissão Tot. Anual geração óleo diesel kg.CO₂.eq/ano: E_{TOT ANUAL} óleo diesel = CE_{eq. diesel} X DA_{SI diesel}	CE_{eq. óleo diesel} : coef. Emis. equiv. diesel kg.CO₂.eq/MWh DA_{SI óleo diesel} : demanda anual gerada c/diesel MWh/ano
12	Emissão Tot. Anual geração biogás kg.CO₂.eq/ano: E_{TOT ANUAL} biogás = CE_{eq. biogás} X DA_{SI biogás}	CE_{eq. biogás} : coef. emissão equiv. biogás kg.CO₂.eq/MWh DA_{SI biogás} : demanda anual gerada c/biogás MWh/ano

FONTE: O autor, 2020.

TABELA 9 – PARÂMETROS E INDICADORES UTILIZADOS NOS CALCULOS PELO METODO 2.

N	PARÂMETRO	ÓLEO DIESEL	FONTE	BIOGÁS	FONTE
1	CE_{eq} – Coefic. Emissão equival. kg.CO₂.eq./ano	653,7	calculado	76,1	calculado
2	DA_{SI} - Demanda Anual dos Sist.Isol. em 2020, MW/ano	4.228.396	EPE	52.560	EPE
3	$E_{TOT ANUAL}$ – Emis.tot. anual da geração, kg.CO₂.eq/ano	calculado de acordo com o cenário			

FONTES: Citadas, elaboração do autor, 2020.

Para complementar a análise da substituição do óleo diesel pelo biogás, pode-se determinar, ainda, as relações entre os consumos unitários de óleo diesel e biogás em kg/kWh, e entre suas respectivas emissões específicas de CO₂ equivalentes em kg.CO₂.eq./MWh, utilizando as equações da Tabela 10 e os parâmetros da Tabela 11.

TABELA 10 – EQUAÇÕES UTILIZADAS NO CALCULO DE RELAÇÕES DE CONSUMOS E EMISSÕES

EQ	FÓRMULA	PARÂMETROS
13	Rel. Consumo $\text{biogás/diesel} = C_{UN \text{ biogás}} \div C_{UN \text{ diesel}}$	$C_{UN \text{ biogás}}$: consumo unitário de biogás em kg/kWh $C_{\text{óleo diesel}}$: consumo unit. óleo diesel em kg/kWh
14	Rel. Emissão $\text{diesel/biogás} = EE_{\text{diesel}} \div EE_{\text{biogás}}$	$EE_{\text{óleo diesel}}$: emis. espec. diesel em kg.CO₂.eq./MWh $EE_{\text{biogás}}$: emissão espec. biogás em kg.CO₂.eq./MWh

FONTE: O autor, 2020.

TABELA 11 – PARÂMETROS E INDICADORES UTILIZADOS NOS CALCULOS DAS RELAÇÕES CONSUMO E EMISSÕES.

N	PARÂMETRO	ÓLEO DIESEL	FONTE	BIOGÁS	FONTE
1	C_{UN} - consumo unitário do combustível em kg/kWh	345	ANEEL	767	VENDRAME
2	EE : emissão especif. do combust. kg.CO₂.eq./MWh	653,7	calculado	76,1	calculado

FONTES: Citadas, elaboração do autor, 2020.

6.2. Cenários de análise

Para analisar a redução das emissões de GEE na geração de energia elétrica dos Sistemas Isolados, considerando apenas a parcela de geração de base, são propostos 3 cenários de utilização de combustível para os geradores dos Sistemas Isolados:

1. Geração da demanda OD¹⁴ com 100% de óleo diesel (base);
2. Geração da demanda OD com 50% de óleo diesel e 50% de biogás;
3. Geração da demanda OD 100% de biogás.

7. CÁLCULO DAS EMISSÕES

Conforme descrito no item anterior, as emissões de GEE resultantes da geração da demanda OD, prevista pela EPE para os Sistemas Isolados em 2020, serão calculadas por 2 métodos, considerando 3 cenários distintos de utilização de combustível na geração.

7.1. Cenário 1 (base): geração com 100% de óleo diesel

Neste cenário base, considera-se a geração de energia elétrica para atender a demanda atendida atualmente com óleo diesel (Demanda OD), prevista para os Sistema Isolados em 2020 (Tabela 3) com o mesmo uso atual de 100% do combustível óleo diesel.

7.1.1. Cálculo das Emissões de GEE pelo Método 1

Considerando as equações e os parâmetros apresentados nas Tabela 6 e 7:

- i. Determina-se o consumo unitário de óleo diesel em kg/MWh utilizando a Equação (1):

$$C_{UN \text{ óleo diesel}} = 0,404 \text{ l/kWh} \times 0,853 \text{ kg/l} = 0,345 \text{ kg/kWh} = \mathbf{345 \text{ kg/MWh}}$$

¹⁴ **Demanda OD:** parcela da demanda anual prevista pela EPE para os Sistemas Isolados em 2020 que é atualmente atendida por geração a base de óleo diesel.

- ii. Calcula-se o valor da emissão específica do óleo diesel em kg.CO₂.eq./MWh utilizando a Equação (3):

$$EE_{\text{óleo diesel}} = 2,764 \text{ MtCO}_2\text{eq/ano} \div 4.228.396 \text{ MWh/ano} = 0,6537 \text{ t.CO}_2\text{eq/MWh} = \mathbf{653,7 \text{ kg.CO}_2\text{eq/MWh}}$$

- iii. Com os valores calculados pelas Equações (1) e (3) utiliza-se a Equação (5) para determinar a emissão unitária de GEE do óleo diesel em kg.CO₂.eq./kg:

$$E_{\text{unit.óleo diesel}} = 653,7 \text{ kg.CO}_2\text{eq./MWh} \div 345 \text{ kg/MWh} = \mathbf{1,895 \text{ kg.CO}_2\text{eq./kg}}$$

- iv. Com a Equação (7) calcula-se a quantidade de óleo diesel necessária para gerar a demanda anual total de energia elétrica dos Sistemas Isolados atualmente geradas por este combustível:

$$Q_{\text{óleo diesel}} = 345 \text{ kg/MWh} \times 4.228.396 \text{ MWh/ano} = \mathbf{1.458.796.620 \text{ kg/ano}}$$

- v. Finalmente, com os valores calculados pelas Equações (5) e (7), utiliza-se a Equação (9) para determinar a emissão total anual de GEE neste cenário em kg.CO₂.eq./ano:

$$E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel}} = 1,895 \text{ kg.CO}_2\text{eq./kg} \times 1.458.796.620 \text{ kg/ano} = \mathbf{2.764.419.595 \text{ kg.CO}_2\text{eq./ano}}$$

7.1.2. Cálculo das Emissões de GEE pelo Método 2

Considerando as equações e os parâmetros apresentados nas Tabela 8 e 9, utiliza-se a Equação (11), o valor já calculado pela Equação (3) e a demanda total de geração de energia elétrica dada pela Tabela 3, e determina-se diretamente a emissão total anual de GEE neste cenário em kg.CO₂.eq./ano:

$$E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel}} = 653,7 \text{ kg.CO}_2\text{eq./MWh} \times 4.228.396 \text{ MWh/ano} = \mathbf{2.764.102.465 \text{ kg.CO}_2\text{eq./ano}}$$

7.2. Cenário 2: geração com mix de 50% de óleo diesel e 50% de biogás de biomassa

Neste cenário, considera-se a geração de energia elétrica para atender a demanda total prevista dos Sistema Isolados em 2020, atualmente gerada apenas com a utilização de óleo diesel, considerando o uso de 50% do combustível óleo diesel e 50% de biogás de biomassa:

7.2.1. Cálculo das Emissões pelo Método 1

Considerando as equações e os parâmetros apresentados nas Tabela 6 e 7:

- i. Determina-se o consumo unitário de óleo diesel e de biogás em kg/MWh utilizando as Equações (1) e (2):

$$C_{UN \text{ óleo diesel}} = 0,404 \text{ l/kWh} \times 0,853 \text{ kg/l} = 0,345 \text{ kg/kWh} = \mathbf{345 \text{ kg/MWh}}$$

$$C_{UN \text{ biogás}} = 0,667 \text{ m}^3/\text{kWh} \times 1,15 \text{ kg/m}^3 = 0,767 \text{ kg/kWh} = \mathbf{767 \text{ kg/MWh}}$$

- ii. Calcula-se o valor da emissão específica do óleo diesel e do biogás em kg.CO₂.eq./MWh utilizando as Equações (3) e (4):

$$EE_{\text{ óleo diesel}} = 2,764 \text{ MtCO}_2\text{eq/ano} \div 4.228.396 \text{ MWh/ano} = 0,6537 \text{ t.CO}_2\text{.eq/MWh} = \mathbf{653,7 \text{ kg.CO}_2\text{.eq/MWh}}$$

$$EE_{\text{ biogás}} = 0,004 \text{ MtCO}_2\text{eq/ano} \div 52.560 \text{ MWh/ano} = \mathbf{76,1 \text{ kg.CO}_2\text{.eq/MWh}}$$

- iii. Com os valores calculados pelas Equações (1), (2), (3) e (4) utilizam-se as Equações (5) e (6) para determinar as emissões unitárias de GEE do óleo diesel e do biogás em kg.CO₂.eq./kg:

$$E_{\text{ unit-óleo diesel}} = 653,7 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./MWh} \div 345 \text{ kg/MWh} = \mathbf{1,895 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./kg}}$$

$$E_{\text{ biogás}} = 76,1 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./MWh} \div 767 \text{ kg/MWh} = \mathbf{0,099 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./kg}}$$

- iv. Com as Equações (7) e (8) calcula-se as quantidades de óleo diesel e de biogás necessárias para cada uma destas fontes gerarem 50% da demanda anual de

energia elétrica dos Sistemas Isolados, atualmente gerada apenas com óleo diesel:

$$Q_{\text{óleo diesel}} = 345 \text{ kg/MWh} \times 2.114.198 \text{ MWh/ano} = \mathbf{729.398.310 \text{ kg/ano}}$$

$$Q_{\text{biogás}} = 767 \text{ kg/MWh} \times 2.114.198 \text{ MWh/ano} = \mathbf{1.621.589.866 \text{ kg/ano}}$$

- v. Finalmente, com os valores calculados pelas Equações (5), (6), (7) e (8), utilizam-se as Equações (9) e (10) para determinar as emissões totais anuais de GEE devida a cada uma das fontes e logo a soma das duas em kg.CO₂.eq./ano:

$$\begin{aligned} E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel}} &= 1,895 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./kg} \times 729.398.310 \text{ kg/ano} = \\ &= \mathbf{1.382.209.797 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./ano}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel}} &= 0,099 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./kg} \times 1.621.589.866 \text{ kg/ano} = \\ &= \mathbf{160.537.397 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./ano}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel + biogás}} &= 1.382.209.797 + 160.537.397 = \\ &= \mathbf{1.542.747.194 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./ano}} \end{aligned}$$

7.2.2. Cálculo das Emissões de GEE pelo Método 2

Considerando as equações e os parâmetros apresentados nas Tabela 8 e 9, utilizam-se as Equações (11) e (12), os valores já calculados pelas Equações (3) e (4) e a demanda total de geração de energia elétrica dada pela Tabela 3, atualmente gerada apenas com óleo diesel, e determina-se diretamente a emissão total anual de GEE com geração de 50% da demanda com óleo diesel e 50% com biogás:

Óleo diesel:

$$E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel}} = EE_{\text{óleo diesel}} \times 50\% \times DA_{SI \text{ óleo diesel}}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel}} &= 653,7 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./MWh} \times 2.114.198 \text{ MWh/ano} = \\ &= \mathbf{1.382.051.233 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./ano}} \end{aligned}$$

Biogás:

$$E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel}} = EE_{\text{biogás}} \times 50\% \text{ DA}_{\text{SI óleo diesel}}$$

$$E_{\text{TOT ANUAL biogás}} = 76,1 \text{ kg.CO}_2\text{.eq/MWh} \times 2.114.198 \text{ MWh/ano} = \\ = 160.890.468 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./ano}$$

Óleo diesel + Biogás:

$$E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel + biogás}} = 1.382.051.233 + 160.890.468 = \\ = \mathbf{1.542.941.701 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./ano}}$$

7.3. Cenário 3: geração com 100% de biogás de biomassa

Neste cenário, considera-se a geração de energia elétrica com o uso de 100% do combustível biogás de biomassa para atender a demanda total prevista dos Sistema Isolados em 2020 (Tabela 3), que, no cenário base, seria gerada com 100% de óleo diesel.

7.3.1. Cálculo das Emissões de GEE pelo Método 1

Considerando as equações e os parâmetros apresentados nas Tabela 6 e 7:

- i. Determina-se o consumo unitário de biogás em kg/MWh utilizando a Equação (2):

$$C_{\text{UN biogás}} = 0,667 \text{ m}^3/\text{kWh} \times 1,15 \text{ kg/m}^3 = 0,767 \text{ kg/kWh} = \mathbf{767 \text{ kg/MWh}}$$

- ii. Calcula-se o valor da emissão específica do biogás em kg.CO₂.eq./MWh utilizando a Equação (4):

$$EE_{\text{biogás}} = 0,004 \text{ MtCO}_2\text{eq/ano} \div 52.560 \text{ MWh/ano} = \mathbf{76,1 \text{ kg.CO}_2\text{.eq/MWh}}$$

- iii. Com os valores calculados pelas Equações (2) e (4) utiliza-se a Equação (6) para determinar a emissão unitária de GEE do biogás em kg.CO₂.eq./kg:

$$E_{\text{unit. biogás}} = 76,1 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./MWh} \div 767 \text{ kg/MWh} = \mathbf{0,099 \text{ kg.CO}_2\text{.eq./kg}}$$

- iv. Com a Equação (8) calcula-se a quantidade de biogás necessária para gerar a demanda anual total de energia elétrica dos Sistemas Isolados, atualmente gerada apenas com óleo diesel:

$$Q_{\text{biogás}} = 767 \text{ kg/MWh} \times 4.228.396 \text{ MWh/ano} = \mathbf{3.243.179.732 \text{ kg/ano}}$$

- v. Finalmente, com os valores calculados pelas Equações (6) e (8), utiliza-se a Equação (10) para determinar a emissão total anual de GEE:

$$\begin{aligned} E_{\text{TOT ANUAL óleo diesel}} &= 0,099 \text{ kg.CO}_2.\text{eq./kg} \times 3.243.179.732 \text{ kg/ano} = \\ &= \mathbf{321.074.794 \text{ kg.CO}_2.\text{eq./ano}} \end{aligned}$$

7.3.2. Cálculo das Emissões de GEE pelo Método 2

Considerando as equações e os parâmetros apresentados nas Tabela 8 e 9, utiliza-se a Equação (12), o valor já calculado pela Equação (4) e a demanda total de geração de energia elétrica dada pela Tabela 3, e determina-se diretamente a emissão total anual de GEE neste cenário em kg.CO₂.eq./ano:

$$\begin{aligned} E_{\text{TOT ANUAL biogás}} &= 76,1 \text{ kg.CO}_2.\text{eq/MWh} \times 4.228.396 \text{ MWh/ano} = \\ &= \mathbf{321.780.936 \text{ kg.CO}_2.\text{eq./ano}} \end{aligned}$$

8. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos estão resumidos nas Tabelas 12 e 13, apresentadas a seguir:

TABELA 12 – CONSUMOS DE COMBUSTÍVEL NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA P/ 3 CENÁRIOS DE UTILIZAÇÃO DE ÓLEO DIESEL E BIOGÁS.

Cenários	Geração Estimada (MWh/ano)		Consumos Unitários (t/MWh)		Consumos Totais (t/ano)		Redução do Consumo de óleo diesel em relação ao Cenário 1 (base)	
	óleo diesel	biogás	óleo diesel	biogás	óleo diesel	biogás	t/ano	%
1	4.228.396	-			1.458.797	-	-	0%
2	2.114.198	2.114.198	0,345	0,767	729.398	1.621.590	-729.398	-50%
3	-	4.228.396			-	3.243.180	-1.458.797	-100%

FONTE: O autor, 2020.

TABELA 13 – REDUÇÃO DAS EMISSÕES ESTIMADAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM TON.CO₂.EQ./ANO P/ 3 CENÁRIOS DE UTILIZAÇÃO DE ÓLEO DIESEL E BIOGÁS, CALCULADAS POR 2 MÉTODOS.

Cenários	Geração estimada por fonte (MWh/ano)		Emissões (t.CO ₂ .eq./ano)		Redução de emissões em Relação ao Cenário 1 (base)			
	óleo diesel	biogás	Método 1	Método 2	t.CO ₂ .eq./ano		%	
					Método 1	Método 2	Método 1	Método 2
1	4.228.396	-	2.764.420	2.764.102	-	-	-	-
2	2.114.198	2.114.198	1.542.747	1.542.942	-1.221.672	-1.221.161	-44%	-44,18%
3	-	4.228.396	321.075	321.781	-2.443.345	-2.442.322	-88%	-88,36%

FONTE: O autor, 2020.

No **Cenário 1**, situação atual e cenário base de comparação, considera-se a geração total anual de energia elétrica dos Sistemas Isolados no Brasil utilizando 100% de óleo diesel,

com o consumo de 1,46 milhões de toneladas deste combustível fóssil e a emissão calculada de 2.764.420 t.CO₂.eq /ano pelo Método 1 e 2.764.102 t.CO₂.eq /ano pelo Método 2.

No **Cenário 2**, considera-se 50% de substituição do óleo diesel pelo biogás de biomassa e constatamos que, apesar do consumo de 1,62 milhões de toneladas de biogás, consegue-se uma redução de 729.398 toneladas no consumo de óleo diesel e de 44% nas emissões de GEE em relação ao cenário base, onde 100% da geração é à base do combustível fóssil. Em termos quantitativos, a emissão anual combinada calculada neste cenário pelo Método 1 é de 1.542.747 t.CO₂ equivalentes, o que representa uma redução de 1.221.672 t.CO₂.eq/ano, e pelo Método 2 de 1.542.942 t.CO₂ equivalentes, o que representa uma redução de 1.221.161 t.CO₂.eq/ano, ambos em relação ao **Cenário 1** (base).

No **Cenário 3**, considerando a geração de energia elétrica utilizando 100% de biogás de biomassa em substituição do óleo diesel, apesar da necessidade de consumir 3,24 milhões de toneladas de biogás, a redução do consumo de óleo diesel é de 1,46 milhões de toneladas e a redução das emissões atinge 88% em relação ao cenário base. Neste caso, a emissão anual calculada pelo Método 1 é de apenas 324.318 t.CO₂ equivalentes, representando uma redução da quantidade de emissão de 2.432.808 tCO₂eq /ano e pelo Método 2 de apenas 321.781 t.CO₂ equivalentes, representando uma redução da quantidade de emissão de 2.442.322 t.CO₂.eq/ano, ambos em relação ao **Cenário 1** (base).

Outro importante ponto, que confirma e reforça o benefício da substituição do óleo diesel pelo biogás na geração de energia elétrica dos Sistemas Isolados, é a diferença de seus potenciais energéticos.

Enquanto 1 m³ de biogás, que equivale a 0,66 litros de diesel, possui um poder calorífico entre 5.000 a 7.000 kcal/m³ de gás (AGEITEC-EMBRAPA, 2017), o poder calorífico do óleo diesel é de 10.100 kcal/kg (ANP, 2016)

O biogás, com um teor de metano entre 50 e 80%, terá um PCI entre 4,95 e 7,92 kWh/m³ (AGRENER, 2008), sendo comumente utilizado o valor de 6,0 kWh/m³ (FARRET, 1999). Já o óleo diesel possui um PCI de 12 kWh/kg (ANP, 2016).

Desta forma, apesar da grande diferença entre os consumos de biogás e de óleo diesel na geração da mesma quantidade de energia elétrica, conforme mostrado na Tabela 12, pois o óleo diesel possui um poder calorífico 2 vezes superior ao do biogás que, por sua vez, tem o consumo unitário **2,2 vezes** superior ao do óleo diesel, quando se compara os seus respectivos coeficientes de emissões de CO₂ equivalentes, observa-se que a emissão unitária da geração

com óleo diesel é **8,6 vezes** superior à emissão provocada pelo biogás para a mesma quantidade de energia elétrica gerada.

Considerando as equações e os parâmetros apresentados nas Tabela 10 e 11, estes valores são calculados a seguir pelas Equações (13) e (14):

Relação Consumo $\text{biogás/óleo diesel} = 767 \text{ kg/MWh} \div 345 \text{ kg/MWh} = \mathbf{2,2 \text{ vezes}}$

Relação Emissão $\text{óleo diesel/biogás} = 653,7 \text{ kg.CO}_2\text{.eq/MWh} \div 76,1 \text{ kg.CO}_2\text{.eq/MWh} = \mathbf{8,6 \text{ vezes}}$

Assim, pode-se afirmar que a substituição gradual do óleo diesel por outras fontes renováveis como o biogás para a geração de energia elétrica, inclusive nos Sistemas Isolados, ajudará na redução da emissão de GEE no Brasil.

É relevante observar que a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio¹⁵) certamente ajudará os biocombustíveis a manter e ampliar a sua relevância na composição da matriz energética brasileira e o biogás, oriundo da biodigestão de várias matérias primas abundantes no País, aumentará sua inserção na matriz energética contribuindo para a substituição gradual do óleo diesel na geração elétrica dos Sistemas Isolados.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Embora a geração térmica de energia elétrica a óleo diesel seja mais simples e flexível que a geração a biogás de biomassa, fica clara a vantagem da substituição gradual do óleo diesel pelo biogás na geração de energia elétrica dos Sistemas Isolados, principalmente no que se refere à redução da emissão de GEE destes Sistemas e na economia de divisas com a consequente redução da importação de óleo diesel.

Conforme demonstrado, se por um lado o óleo diesel possui um poder calorífico 2,2 vezes superior e, por consequência, um consumo bem inferior ao do biogás, por outro lado, quando comparadas suas emissões de GEE na geração de energia elétrica, ele apresenta um

¹⁵ O **RenovaBio**, instituído pela Lei nº13.576/2017, é um programa que busca fomentar a expansão dos biocombustíveis em padrões mais sustentáveis com a aplicação de dois instrumentos: metas nacionais de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a matriz de combustíveis e certificação da produção de biocombustíveis, tratando-se da primeira iniciativa em nível nacional de precificação de carbono. Assim, reconhece o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética nacional, com foco na segurança do abastecimento de combustíveis e na mitigação das emissões de GEE.

fator de emissões 8,6 vezes maior que o do biogás e, portanto, no que diz respeito às emissões de GEE, isto resulta em balanço final amplamente favorável à utilização do biogás.

De fato, considerando o cenário de utilização de 100% de biogás de biomassa em substituição do óleo diesel na geração de energia elétrica dos Sistemas Isolados, a redução das emissões de GEE é de mais de 2,4 MtCO₂eq /ano, que representam 88% menos emissões, com a economia de 1,46 milhões de toneladas de óleo diesel.

Além disso, é importante destacar que o acesso das comunidades isoladas à energia elétrica por meio de Sistemas Isolados que utilizem, cada vez mais, fontes renováveis e não poluentes, trará **benefícios sociais**, pela inclusão e maior desenvolvimento das comunidades atendidas por esta solução, **benefícios econômicos**, pelo custo evitado com a grande dificuldade de logística de abastecimento, e **benefícios ambientais** pelas emissões evitadas, não contaminação por recorrentes vazamentos de óleo diesel e a adequada gestão de resíduos.

Assim, ficou demonstrada a redução da emissão de GEE na geração elétrica em Sistemas Isolados pela utilização de fontes renováveis, especificamente pela substituição do óleo diesel pelo biogás de biomassa.

Pode-se, portanto, concluir que a substituição proposta deve ser considerada para reduzir a emissão de GEE na geração de energia elétrica dos Sistemas Isolados no Brasil e o resultado esperado deste trabalho acadêmico é que ele possa servir de inspiração e base para a elaboração de um roteiro técnico detalhado que venha a contribuir, de forma efetiva, para a gradual substituição das fontes fósseis, notadamente o óleo diesel, por fontes renováveis, como o biogás de biomassa.

10. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela força que me permitiu chegar à conclusão deste trabalho, mesmo em meio aos diversos desafios, pessoais e profissionais, que enfrentei durante este período.

Agradeço, também, aos integrantes do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, tradicional instituição de ensino superior de nosso País, representados pelo seu capacitado corpo docente, direção e pela administração e tutoria deste Curso.

Ao meu orientador, Professor Marcelo Langer, por sua orientação segura, apoio e incondicional confiança no meu sucesso, apresento meu reconhecimento e agradecimento especiais.

Finalmente, agradeço à minha família que soube compreender e apoiar a minha ausência em muitas oportunidades em favor do tempo dedicado ao curso e a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, MARCELO C. “Potencial Energético de Resíduos Florestais do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira”. EPE, 2018.
- BARBOSA, G., LANGER, M. “Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental.” Unoesc & Ciência - ACSA, Joaçaba, v. 2, n. 1, p. 87 – 96, 2011.
- BARRERA, PAULO. “Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural”. São Paulo: Ícone, p. 11, 1993.
- BEVILACQUA NETO, SAULO S. “Viabilidade Econômica e Financeira de uma Pequena Central Hidrelétrica e sua Inserção na Matriz Energética Brasileira”. Porto Alegre, 2013.
- BLEY JR, CÍCERO. “A Amazônia e a Geração de energias Elétrica, Térmica e Combustível.” 2018
- BLEY JR, CÍCERO. “Microgrid rural para a estabilização do fornecimento de energia no extremo oeste do Paraná.” 2017.
- CAIXETA ARAÚJO, ANA PAULA. “Produção de Biogás a partir de Resíduos Orgânicos utilizando Biodigestor Anaeróbico”. Uberlândia, 2017.
- CASTANÓN, N. J. B. “Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais”. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002. 66 p.
- CERVI, RICARDO G.; ESPERANCINI, MAURA S. T.; BUENO, OSMAR DE C. “Viabilidade Econômica da Utilização do Biogás produzido em Granja Suinícola para Geração de Energia Elétrica. Jaboticabal, 2010.
- DOS SANTOS AMADEU et. al. “Manual de Normatização de Documentos Científicos de acordo com as normas da ABNT”. Curitiba, 2017.
- FERREIRA, M. J. G e ANDRADE, A. M.; “Modelagem de Políticas Públicas para Atendimento Energético a Comunidades Isoladas.” Anais do 4º AGRENER-2002, Campinas/SP, out/2002.
- FERREIRA, M. J. G e FONSECA DE PILLA, ADELINA T.; “Caracterização de Comunidades Isoladas: Aplicação em Comunidade de Ubatuba/SP.” 2003.
- FIGUEIREDO, Carlos Alberto, CARTAXO, Elizabeth Ferreira e DA SILVA, Ennio Peres. “Indicadores do Mercado de energia Elétrica no Estado do Amazonas”. 2011.
- GUIA PARA QUANTIFICAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEES) EM PROJETOS SUBMETIDOS AO BNDES / Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas – Gvces. FGV, 2019.

HALL, D.O; OVEREND, R.P. Biomass-Regenerable Energy”. Johnwilwy, 1987.

MARRECO, JULIANA, BUIATTI, NATALIA e MALAGOLI BUIATTI, GUSTAVO. “O potencial da geração distribuída como estratégia de inclusão energética no Brasil”. 2019.

NIKOS HATZIARGYRIOU, Convener (SC C6) et al., Technical Committee CIGRE WG; “Network of the Future.” 2011.

PLANO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2029 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2019

PLANEJAMENTO DO ATENDIMENTO AOS SISTEMAS ISOLADOS – Horizonte 2024 Ciclo 2019 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2019

POMPERMAYER R. S.; PAULA Jr. D. R. “Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos”. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas: UNICAMP. Anais... Disponível em: Acesso em: 14 abr. 2005.

SANTOS AMADEU et. al. “Manual de Normatização de Documentos Científicos – UFPR”, Curitiba, 2017.

STEPHAN, Jean-Pierre. “Les Transports Routiers et le Rechauffement Climatic – Effet de Serre. Ploufragan, 2005.

TEIXEIRA COELHO, SUANI, VELÁZQUEZ, SILVIA, MARTINS, OSVALDO e CASTRO DE ABREU, FERNANDO. “A conversão da fonte renovável biogás em energia”. 2006.

VENDRAME, Maycon G. “Produção Descentralizada de Biogás: Experiências com Arranjos em Condomínios Rurais. Rio de Janeiro, 2015.

ZANETTE, ANDRÉ L. – “Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil”. Rio de Janeiro, 2009.