

INSTITUTO FEDERAL FLUMINENSE - IFF
POLO DE INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROPRIEDADE INTELECTUAL
E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA PARA INOVAÇÃO - SJB

SANDRO GOMES PINHEIRO

RELATÓRIO TÉCNICO SOBRE A GERAÇÃO HÍBRIDA DE ENERGIA
RENOVÁVEL: SISTEMA BIOGÁS E FOTOVOLTAICO EM UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS

Campos dos Goytacazes
2023

SANDRO GOMES PINHEIRO

RELATÓRIO TÉCNICO SOBRE A GERAÇÃO HÍBRIDA DE ENERGIA
RENOVÁVEL: SISTEMA BIOGÁS E FOTOVOLTAICO EM UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTOS

Relatório técnico final apresentado
como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Propriedade
Intelectual e Transferência de
Tecnologia para Inovação -
PROFNIT- Ponto Focal IFF –
INSTITUTO FEDERAL
FLUMINENSE – POLO DE
INOVAÇÃO – SJB.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ROGERIO ATEM DE CARVALHO
Data: 20/04/2023 15:25:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rogério Atem de Carvalho
Instituto Federal Fluminense - IFF
(Orientador)

Documento assinado digitalmente



NUBIA MOURA RIBEIRO
Data: 25/04/2023 08:44:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Prof. Dra. Nubia Moura Ribeiro
Instituto Federal da Bahia - IFBA

Documento assinado digitalmente



FRANK PAVAN DE SOUZA
Data: 24/04/2023 18:35:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Frank Pavan de Souza
Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P654r Pinheiro, Sandro Gomes
Relatório técnico sobre a geração híbrida de energia renovável: sistema biogás e fotovoltaico em uma estação de tratamento de esgotos / Sandro Gomes Pinheiro - 2023.

77f.

Orientador: Rogério Atem de Carvalho

Relatório técnico (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Curso de Mestrado Profissional de Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação (PROFNIT), Campos dos Goytacazes, RJ, 2023.
Referências: f. 51 a 57.

1. Energia renovável. 2. Biogás. 3. Sistema fotovoltaico. 4. Estação de tratamento de esgotos. I. Carvalho, Rogério Atem, orient. II. Título.

PINHEIRO, Sandro Gomes. **Prospecção Tecnológica em Geração Híbrida de Energia Renovável a partir de Sistemas Fotovoltaico e Biogás em uma Estação de Tratamento de Efluentes Sanitários**. 2022. f. (Mestrado em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação) – Instituto Federal Fluminense - IFF, São João da Barra - RJ, 2022.

RESUMO

Diante da necessidade de encontrar fontes de energia alternativas, começou-se uma busca por novas fontes de energia renováveis e inesgotáveis. Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica e ambiental de uma planta híbrida de geração de energia elétrica para unidades de tratamento de efluentes sanitários, por meio dos sistemas biogás e fotovoltaico, a partir da compensação do consumo de eletricidade da estação de tratamento de esgotos (ETE Chatuba) e a fornecedora de energia elétrica do município, a Enel Brasil. Para tanto, a metodologia utilizada está pautada numa revisão bibliográfica relacionada à temática de produção de energia, a partir da utilização de biogás e energia solar. A abordagem do tratamento da coleta de dados é quantitativa em função da necessidade do estudo dos fenômenos que ocorrem em um processo de fermentação para geração de biogás e pelo efeito fotovoltaico em placas solares. Para o desenvolvimento do projeto, foi utilizado o software Homer Pro, para modelagem do comportamento físico do sistema de energia proposto e seu custo de ciclo de vida, o qual compreenderá o custo de instalação e operação do sistema. A análise bibliométrica realizada na base CAPES e plataformas ORBIT, INPI e ESPACENET indicou a existência de 645 registros relacionados às tecnologias de geração de energia híbrida, desses registros, 06 patentes, 03 artigos e 03 dissertações foram selecionadas. Na análise da viabilidade econômica, apurou-se que cada fonte de energia gerará uma economia de aproximada de R\$ 170.000,00 (cento e setenta mil reais) ao ano. Concluiu-se através desse estudo que será possível economizar, ao longo de 25 anos, algo em torno de R\$ 3.242.000,00 (três milhões, duzentos e quarenta e dois mil reais), usando tanto o biogás como a fotovoltaica para produzir energia elétrica.

Palavras-chave: energia híbrida; biogás; fotovoltaico.

PINHEIRO, Sandro Gomes. **Technological Prospection in Hybrid Generation of Renewable Energy from Photovoltaic Systems and Biogas in a Sanitary Wastewater Treatment Plant.** 2022. f. (Master in Intellectual Property and Technology Transfer for Innovation) - Instituto Federal Fluminense - IFF, São João da Barra - RJ, 2022.

ABSTRACT

In view of the need to find alternative energy sources, a search for new renewable and inexhaustible energy sources has begun. This study aims to evaluate the economic and environmental feasibility of a hybrid plant to generate electricity for wastewater treatment units, through biogas and photovoltaic systems, from the compensation of electricity consumption of the sewage treatment plant (ETE Chatuba) and the electricity supply utility in the municipality, Enel Brazil. For this, the methodology used is based on a literature review related to the theme of energy production from the use of biogas and solar energy. The approach to the treatment of data collection is quantitative due to the need to study the phenomena that occur in a fermentation process for the generation of biogas and the photovoltaic effect on solar panels. For the development of the project, the Homer Pro software was used, for modeling the physical behavior of the proposed energy system and its life cycle cost, which will comprise the cost of installation and operation of the system. The bibliometric analysis performed in the CAPES base and ORBIT, INPI and ESPACENET platforms indicated the existence of 645 records related to hybrid energy generation technologies. From these records, 06 patents, 03 articles and 03 dissertations were selected. In the economic feasibility analysis, it was found that each energy source will generate an economy of approximately R\$ 170,000.00 (one hundred and seventy thousand reais) per year. It was concluded through this study that it will be possible to save, over 25 years, something around R\$ 3,242,000.00 (three million, two hundred and forty-two thousand reais), using both biogas and photovoltaic to produce electricity.

Keywords: hybrid energy; biogas; photovoltaic.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021	11
FIGURA 2 Participação de Renováveis na matriz elétrica brasileira nos últimos anos	11
FIGURA 3 Crescimento da energia Solar Fotovoltaica em relação a outras fontes renováveis em 2021	12
FIGURA 1A Composição Simplificada dos Esgotos.....	17
FIGURA 4 Digestão anaeróbia de esgoto	20
FIGURA 5 Evolução histórica da tecnologia dos biodigestores.....	25
FIGURA 6 ETE Chatuba	33
FIGURA 7 Ferramenta de análise Homer Pro micro grid	35
FIGURA 8 Payback de 25 anos entre as duas fontes de energia	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Composição do Biogás.....	22
TABELA 2 Dados de consumo de energia e custos da ETE Chatuba	39
TABELA 3 Parâmetros para avaliação da vazão do biogás da ETE Chatuba	40
TABELA 4 Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás	42
TABELA 5 Caracterização dos parâmetros das amostras de biogás na ETE Chatuba	43
TABELA 6 Investimentos fixos do sistema movido a Biogás.....	44
TABELA 7 Investimentos fixos do sistema fotovoltaico	45

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIE	Agência Internacional de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FAETEC	Fundação de Apoio à Escola Técnica
GD	Geração Distribuída
HES	Sistema Energético Híbrido Biogás-Diesel-Bateria
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
MCI	Motor à Combustão Interna
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
ONU	Organização das Nações Unidas
PCCE	Produção Combinada de Calor e Eletricidade
PROFNIT	Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação
RCE's	Reduções Certificadas de Emissão
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Histórico.....	10
1.2 Objetivos.....	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Esgotos Sanitários.....	16
2.2 Tratamento de Esgoto.....	17
2.3 Biogás no Mundo	18
2.4 Biogás no Brasil	19
2.5 Formação do Biogás	20
2.5.1 Composição dos gases do biogás.....	22
2.6 Sistema Híbrido de Geração de Energia Renovável	23
2.6.1 Geração de energia por meio de sistema biogás e fotovoltaico	24
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 Delineamento da Pesquisa	27
3.2 Bibliometria.....	27
3.2.1 Análise Bibliométrica	28
3.2.2 Portal de periódicos da Capes	29
3.2.3 Plataforma ORBIT.....	30
3.2.4 Plataforma INPI.....	30
3.2.5 Plataforma ESPACENET	31
3.3 Estratégia de Buscas na Base de Dados CAPES e nas Plataformas ORBIT, INPI E ESPACENET	31
3.4 O Locus da Pesquisa	32
3.5 Visita Técnica	32
3.6 Técnica de Coleta de Dados.....	34
3.7 Técnica de Análise de Dados	34
4 RESULTADOS.....	36
4.1 Análise Bibliométrica	36
4.2 Apresentação do Consumo e Custos com Energia Elétrica da ETE Chatuba	38
4.3 Medições de Vazão de Biogás	40
4.3.1 Equivalência entre o potencial de biogás e energia elétrica em kwh	41
4.3.2 Avaliação dos gases presentes nas amostras realizadas	42

4.3.3 Avaliação do potencial do biogás da ETE Chatuba e sua conversão em energia elétrica	43
4.3.4 Investimentos em Máquinas e Equipamentos para o sistema Biogás	44
4.4 Avaliação do Potencial Fotovoltaico da ETE Chatuba e sua Conversão em Energia Elétrica	44
4.4.1 Investimentos em Máquinas e Equipamentos para o sistema Fotovoltaico	45
4.5 Resultados da Viabilidade Econômica	45
5 CONCLUSÕES	48
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	49
6 ARTIGO CIENTÍFICO	50
REFERÊNCIAS	51
ANEXO I – CARTA/OFÍCIO DE APOIO/INTERESSE	58
APÊNDICE A – ARTIGO CIENTÍFICO	59

1INTRODUÇÃO

Países com expressivo desenvolvimento econômico e industrial, como EUA, Japão, Alemanha e União Europeia, mesmo precisando de muita energia, possuem custos menores para suprir tamanha necessidade (DINIZ; BERMAN, 2012). A primeira grande crise do petróleo, ocorrida em 1973, foi uma das grandes motivadoras de uma mudança de paradigma para que esses países revissem suas necessidades energéticas e as fontes para suprimi-las.

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE, 2022), a invasão Russa na Ucrânia, em 2022, poderá acarretar uma crise energética mais grave do que ocorreu nos anos 1970 e 80; ao contrário dos episódios anteriores, agora, em 2022, está ocorrendo uma crise do petróleo, uma crise do gás e uma crise da eletricidade ao mesmo tempo e, provavelmente, será mais longa e de alcance global.

Diante desse cenário, a motivação desta pesquisa se dá pela importância que o investimento e desenvolvimento de novos projetos em fontes alternativas de energia, tanto em escala nacional quanto local, representa para a região fluminense. Grande parte da matriz energética brasileira vem da geração hídrica (61%) e está cada vez mais escassa devido aos períodos de seca, daí a necessidade da diversificação de novas fontes alternativas de geração de energia limpa.

Este projeto, portanto, prevê a utilização do gás “estufa” metano proveniente do processo de tratamento dos efluentes sanitários em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) localizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ para a geração de energia elétrica.

1.1 Histórico

O processo de industrialização mundial foi um dos grandes responsáveis, nos últimos 50 anos, pela elevada demanda de energia, em especial a energia elétrica, essencial para a evolução da sociedade (HOBSBAWM, 2014). Com isso, a busca por novas tecnologias também se faz necessário em função dos prejuízos que os combustíveis fósseis causaram e causam ao meio ambiente. O objetivo era atender à crescente demanda de forma técnica, econômica e sustentável.

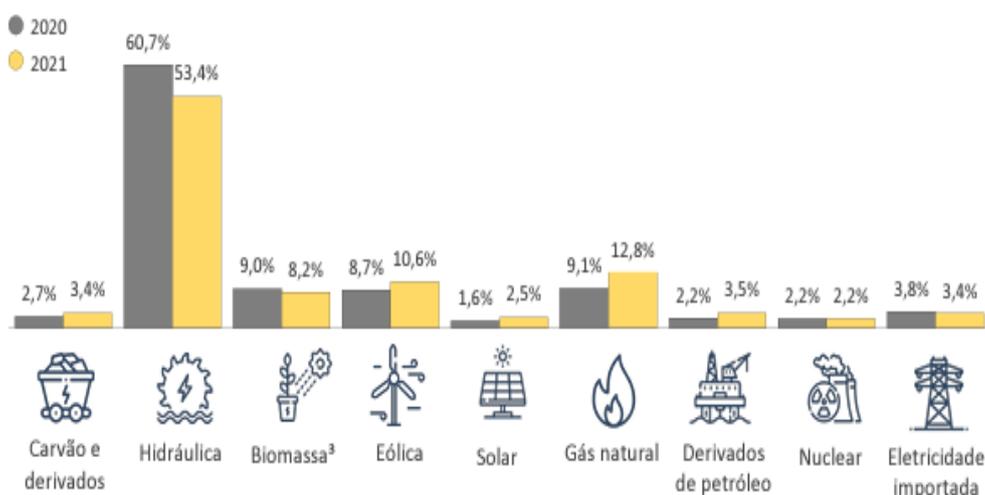
Atualmente, existem diversas tecnologias de conversão para geração de energia elétrica, das quais se destacam as usinas termoelétricas e as usinas hidroelétricas. Nas termoelétricas, a energia provém da queima de combustíveis fósseis, geralmente derivados do petróleo, sendo considerada a forma mais poluente de geração de energia. Já na geração hidroelétrica, a energia elétrica é obtida pela movimentação, pela força da água, das pás de uma ou mais turbinas, denominada energia potencial hidráulica, considerada a menos poluidora, exceto se a construção da usina implicar em inundação de grandes áreas, podendo representar grande impacto ambiental.

No Brasil, a geração hidroelétrica corresponde a 60% de toda matriz energética enquanto a geração termoelétrica corresponde a 12% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Entretanto, em função das mudanças de comportamento dos países desenvolvidos, membros da Organização das Nações Unidas (ONU) – Agenda 21¹ em relação a questões ambientais, a geração híbrida de energia elétrica, a partir de sistemas fotovoltaicos e biogás, apresenta-se como uma fonte de energia moderna e promissora. Em 2021, a oferta interna de energia (total de energia disponibilizada no país) avançou 4,5% em relação ao ano anterior. A participação de renováveis na matriz energética foi marcada pela queda da oferta de energia hidráulica (Figura 1), associada à escassez hídrica e ao acionamento das usinas termoelétricas (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

¹ A Agenda 21 é um dos principais resultados da conferência Eco-92 ou Rio-92, ocorrida no Rio de Janeiro, Brasil, em 1992. O documento representa uma aliança entre todos os povos, necessário para o planejamento participativo na construção de sociedades sustentáveis.

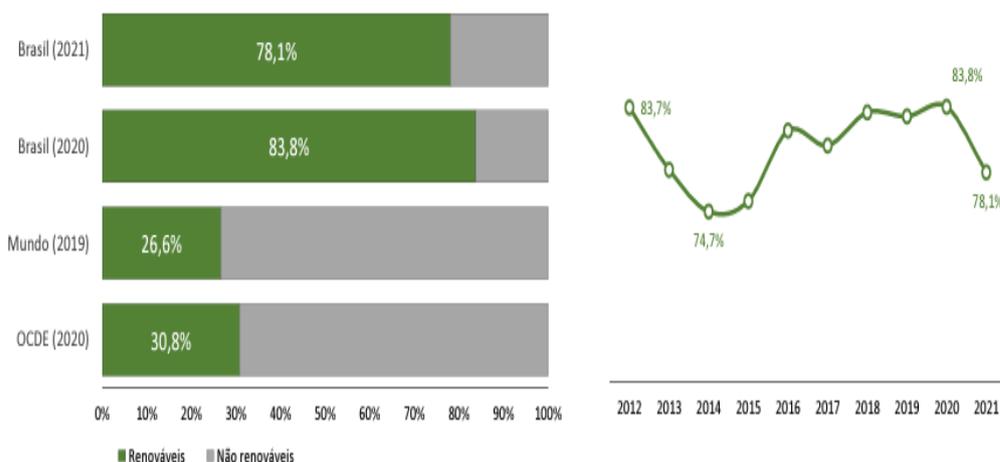
Figura 1 – Matriz elétrica brasileira em 2020 e 2021



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2021).

De acordo com os dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2021, a escassez de chuvas provocou uma redução do nível dos reservatórios das principais hidrelétricas do país e a conseqüente redução da oferta de hidreletricidade. Essa queda foi compensada pelo aumento da oferta de outras fontes, como o carvão vapor (+47,2%), o gás natural (+46,2%) e o solar fotovoltaico (+55,9%). Na Figura 2 é possível perceber que a participação de fontes de energias na matriz elétrica brasileira atingiu 78,1% em 2021.

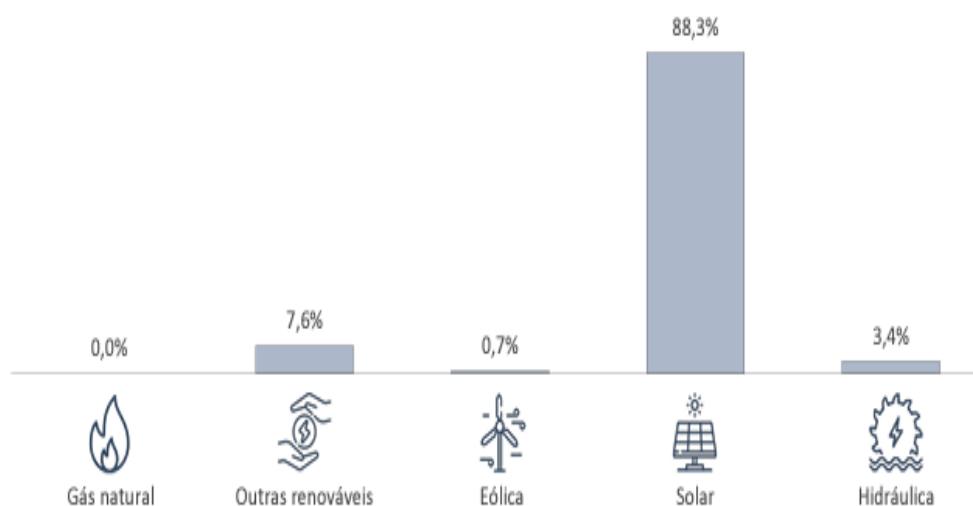
Figura 2 – Participação de Renováveis na matriz elétrica brasileira nos últimos anos



Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2021).

A Figura 3 mostra o crescimento da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, correspondendo a 88,3% da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) em 2021, e foi a principal fonte responsável pelo aumento registrado na geração distribuída. Tal realidade vem sendo construída ao longo de cinco anos e indica uma trajetória de crescimento contínuo da geração solar fotovoltaica em ritmo superior às outras fontes (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Figura 3 – Crescimento da energia Solar Fotovoltaica em relação a outras fontes renováveis em 2021



Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética (2021).

Quanto ao fornecimento de água, de acordo com os dados apresentados pela Fundação Getúlio Vargas (FGV DATASAN, 2022), 83,7% da população conta com abastecimento de água. Porém, apenas 54,1% dos brasileiros dispõem de sistema de coleta de esgoto, dos quais 78,5% têm esgoto tratado. Conclui-se, portanto, que 99,1 milhões de brasileiros não têm acesso a serviços de coleta de esgotos e 34,7 milhões não dispõem de água tratada.

Tendo em vista esse elevado número de pessoas sem acesso à coleta de esgoto, o desenvolvimento de novas fontes de energia renováveis, principalmente em decorrência do uso do biogás de esgoto, será capaz de contribuir positivamente para a expansão de investimentos voltados para a área de saneamento e para a redução da dependência de geração de energia elétrica

proveniente de combustíveis fósseis.

Uma possível forma de contribuir para a redução do não tratamento do esgoto, é realizar a extração do biogás (ZANETTE, 2009). O biogás é composto, em sua maioria, por gás metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂); e outros gases, como o gás sulfídrico (H₂S), hidrogênio (H₂) e nitrogênio (N₂), estão presentes em concentrações menores, podendo ser utilizado em motores de combustão interna para geração de energia elétrica em ambientes rurais ou industriais. Para Zanette (2009), dentre as tecnologias para aproveitamento da energia gerada nas estações de esgoto, a digestão anaeróbia, a partir do uso de biodigestores, vem sendo cada vez mais utilizada para permitir a extração de biogás.

Desde o início dos anos 2000, o consumo de energia elétrica no Brasil cresceu de forma significativa. Em 2021, a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) chegou a 679,20 TWh. Para 2022 é esperado um aumento de 4,5%, com perspectiva de crescimento de 46% para as energias não renováveis e recuo de 8,5% para as renováveis. Nessas condições, a proporção das energias renováveis deve recuar mais de 6 pontos percentuais. O Brasil conta com 9.869 empreendimentos associados a energias renováveis em operação, totalizando 182 GW de potência (ANEEL, 2022).

Em 2021, a estimativa da população mundial indicou 7,8 bilhões de habitantes, de acordo com dados do portal WorldO'meter (2022), metade dessa população, cerca de 3,5 bilhões, vive em centros urbanos. Segundo o relatório publicado pela ONU (ONU, 2022), em 2050 a tendência é que o número de pessoas no mundo chegue a 9,7 bilhões. Já para 2100, a estimativa é de 11 bilhões. Em resumo, a energia hoje é condição indispensável para a sobrevivência da população, sobretudo a urbana.

Como suprir a energia necessária para atender a essas necessidades e quais fontes de energia vão atendê-las são perguntas a serem respondidas agora e por gerações futuras. Uma certeza, no entanto, é que as nações em desenvolvimento aumentarão seu uso de energia per capita significativamente. Em 1997, a China construiu usinas geradoras de eletricidade capazes de atender uma demanda da ordem de 300 megawatts por semana. Essas usinas são movidas a carvão e usam uma tecnologia ineficiente para a produção de

eletricidade (BERNARDES; GIAROLA, 2019).

A emissão mundial de gás metano pelo setor de energia é 70% maior do que o informado oficialmente pelos governos mundiais (IEA, 2022). O metano responde por cerca de 30% do aumento da temperatura global desde a revolução industrial. Embora seja um gás que se dissipe mais rapidamente que o gás carbônico, tem poder maior no efeito-estufa. O setor de energia é responsável por cerca de 40% das emissões de metano e envolve principalmente as fontes fósseis, como carvão e óleo combustível utilizados nas usinas geradoras de energia (IEA, 2022).

Estudos sobre a emissão de gases poluentes indicam que 90% do metano (CH₄) emitido para a atmosfera deriva-se da decomposição de biomassa, sendo o restante de origem fóssil, como exemplo, dos processos petroquímicos (ALVES, 2000). A biomassa como matéria-prima pode originar-se de quatro fontes diferentes:

a) Resíduos agrícolas: estrume de animais e dejetos; b) Resíduos industriais: efluentes do processo agroalimentar ou de outras indústrias; c) Lamas: resultantes da depuração de estações de tratamento de esgoto; d) Lixo doméstico: provenientes de aterros, após a separação de componentes minerais e plásticos. (CONSTANT *et al.*, 1989, p. 345).

A digestão anaeróbica é uma tecnologia processada em equipamentos de ambiente controlado, denominados biodigestores, cuja função é fornecer condições propícias para que um grupo distinto de bactérias degrade o material orgânico, com consequente liberação de gás, em especial o gás metano (CH₄). Refere-se ao processo mais utilizado para conversão da carga orgânica de dejetos em biogás e biofertilizantes (CERVI, 2009).

Considerando o cenário apresentado, surgiu o seguinte problema desta pesquisa: um sistema híbrido de geração de energia proveniente do aproveitamento do esgoto e da energia solar seria viável do ponto de vista ambiental e econômico?

Na tentativa de responder ao questionamento apresentado, parte-se da hipótese de que existe viabilidade econômica e ambiental para este projeto em função da abundância de esgoto e sol, fundamentais para a geração de energia.

A utilização combinada da do biogás e da energia fotovoltaica em estações de tratamento de efluentes sanitários domésticos impacta direta e positivamente na redução da emissão de gases tóxicos ao meio ambiente e contribui para a diminuição da utilização de energias não-renováveis.

Para fundamentar o estudo, este projeto está estruturado em oito partes, incluindo esta introdução. Na sequência, encontram-se os objetivos, a revisão de literatura, a metodologia, além dos resultados esperados, as conclusões e as referências.

1.2 Objetivos

Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a viabilidade econômica e ambiental de uma planta híbrida de geração de energia elétrica para unidades de tratamento de efluentes sanitários, por meio dos sistemas biogás e fotovoltaico.

Objetivos Específicos

- Estimar uma métrica de geração de biogás proveniente das estações de tratamento de esgoto de Campos dos Goytacazes/RJ;
- Realizar uma revisão bibliográfica sobre geração híbrida de energia elétrica por meio dos sistemas biogás e fotovoltaico;
- Compreender a correlação entre a utilização combinada da energia fotovoltaica e da energia do biogás em uma estação de tratamento de efluentes sanitários domésticos e a redução da emissão de gases tóxicos ao meio ambiente;
- Mensurar o valor da economia de energia elétrica em função do uso do sistema híbrido de geração de energia proposto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Um sistema híbrido que combina duas ou mais fontes de geração de energia pode usar tecnologias tanto provenientes de fontes renováveis, tais como tecnologias fotovoltaicas, turbinas eólicas ou hidráulicas, quanto fontes provenientes de energias não renováveis como geradores a diesel ou gás liquefeito de petróleo (GLP). Marini e Rossi (2015) constataram que o uso de sistemas híbridos promove grande redução no consumo de combustível em comparação a um sistema alimentado apenas por uma fonte motor-gerador.

Por meio dos avanços nas pesquisas em automação e controle de sistemas híbridos, foi descoberto que a inclusão de sistemas de armazenamento da energia excedente da geração híbrida pode ser uma opção bem-sucedida para fornecer energia limpa e eficiente.

Para fundamentar as discussões dessa pesquisa, este referencial teórico foi dividido nos seguintes tópicos, a saber: Esgotos Sanitários, Tratamento de Esgoto, Biogás no Mundo, Biogás no Brasil, Formação do Biogás e Sistema Híbrido de Geração de Energia Renovável.

2.1 Esgotos Sanitários

Esgoto é o termo usado para definir o descarte de água após a utilização humana. Pode ser de origem doméstica, industrial ou pluvial. Sem tratamento adequado, pode causar danos à saúde da população por meio da transmissão de doenças, poluindo fontes, rios e mares (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994 apud ZILOTTI, 2012).

O esgoto doméstico é constituído de resíduos resultantes do asseio pessoal, das necessidades fisiológicas, da lavagem de roupas e de utensílios domésticos e da preparação de alimentos (PEREIRA, 2004). Além de sólidos, o esgoto possui gases dissolvidos em concentrações variáveis. Dentre eles estão o oxigênio, o gás carbônico, o nitrogênio, o gás sulfídrico e o metano. São encontrados também inúmeros microrganismos vivos, como bactérias, que podem ser causadoras de doenças (patogênicos), ou são ótimos colaboradores para o processo de tratamento e depuração dos resíduos (VON SPERLING,

1996).

Os esgotos sanitários, segundo Chernicharo (2007), geralmente contêm 99,9% de água e 0,1% de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como micro-organismos. Por causa dessa fração de 0,1%, existe a necessidade de se tratar esses efluentes.

2.2 Tratamento de Esgoto

Os processos de tratamento de esgoto objetivam diminuir o efeito poluidor que os esgotos possuem antes que retornem ao meio ambiente. Normalmente, a separação de materiais sólidos ocorre por meio de processos físicos, químicos e biológicos, existindo vários processos diferentes para que isso ocorra (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

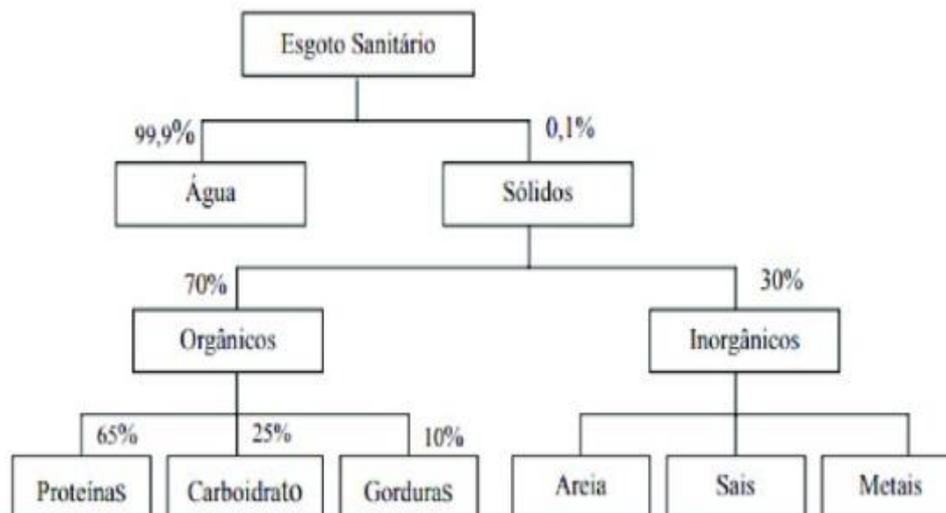
A primeira etapa do processo padrão para o tratamento do efluente consiste em reter os materiais maiores que chegam às Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), por meio dos sistemas de “gradeamento”. Nele ficarão presos, em diferentes níveis, materiais como galhos de árvore, sacolas plásticas, absorventes etc. Na sequência, o esgoto passa por caixas de areia para a retirada de materiais sólidos granulares.

A segunda etapa ocorre nos decantadores primários, em que as partículas sólidas se sedimentam no fundo de um tanque. Nessa fase, ainda existem algumas partículas que, por serem muito pequenas, não se precipitam. Com isso, é adicionada uma substância coagulante capaz de unir essas partículas, formando outras maiores e mais densas, que sedimentam e ficam depositadas no tanque decantador. Todos os sedimentos acumulados ao fundo do tanque decantador, denominados “lodos”, são encaminhados para adensadores e digestores anaeróbios. Nos digestores anaeróbios, bactérias anaeróbias consomem boa parte da matéria orgânica contida nesse lodo, então, esse lodo é desidratado e prensado para que ocorra uma diminuição maior de seu volume. Após esse processo, o lodo pode ser descartado em aterro sanitário ou usado como esterco para a agricultura (CHERNICHARO, 2007). É justamente nesses digestores anaeróbios que ocorre a liberação de biogás, a partir do processo de oxidação da matéria orgânica.

A Figura 1A apresenta a composição simplificada dos esgotos, as

características dos materiais e as etapas para o respectivo tratamento.

Figura 1A – Composição simplificada dos esgotos



Fonte: Adaptado de Nuvolari (2003).

Verifica-se, conforme apresentado na Figura 1A, que grande parte da composição do efluente sanitário é água (99,9%). A fração restante (0,01%) inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, assim como microrganismos.

2.3 Biogás no Mundo

No século XIX, Ulysse Gayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água, a 35°C. Com isso, obteve 100 litros de gás por m³ de matéria orgânica. Em 1884, Louis Pasteur apresentou à Academia das Ciências os trabalhos desse aluno e considerou que essa fermentação poderia resultar em um gás a ser utilizado como fonte de aquecimento e para iluminação (ZACHOW, 2000).

Já em 1859, em Bombaim, na Índia, realizou-se a primeira experiência de utilização de biogás. Em 1895, dessa vez na Europa, ocorreu a primeira experiência com a utilização do biogás para iluminação de algumas ruas da cidade de Exter, na Inglaterra. A partir daí, seguiram-se outras experiências motivadas pelo entusiasmo que o processo atingiu.

Entre as décadas de 1950 e 60, a abundância das fontes de energia tradicionais desmotivou o avanço do desenvolvimento de tecnologias para produção e

aproveitamento de biogás, principalmente em países desenvolvidos.

Entretanto, China e Índia deram prosseguimento a pesquisas envolvendo a produção e utilização do biogás em áreas rurais (GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE, 2009).

A partir da crise energética na década de 1970, o biogás voltou a despertar interesse tanto dos países ricos como dos países pobres, considerados de “terceiro mundo”. Mas, nenhum país desenvolveu essa tecnologia como China e Índia desenvolveram (LINDEMEYER, 2008).

Desde o final da década de 1990, o biogás não é mais encarado como um subproduto, obtido a partir da decomposição anaeróbia, mas sim como uma forte motivação para pesquisas que buscam formas de produção energética que possibilitem a redução do uso de fontes não renováveis (COSTA, 2006).

2.4 Biogás no Brasil

No Brasil, o interesse pelo biogás surgiu entre as décadas de 1970 e 80, principalmente entre produtores rurais, da área de suinocultura. Surgiram programas oficiais que estimularam a implantação de biodigestores para a geração de energia e produção de biofertilizante e, assim, diminuir os impactos ambientais dessa atividade. Os objetivos desses programas do governo eram reduzir a dependência das pequenas propriedades rurais na aquisição de adubos químicos e a redução do gasto com energia térmica para os usos em cozinha, aquecimento, iluminação e refrigeração, assim como reduzir a poluição causada pelos dejetos dos animais. Os resultados não foram os esperados e a maioria dos sistemas foi desativada (GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE, 2009).

Na década de 1990, ocorreu uma movimentação sobre a possibilidade de a geração de energia do biogás ser inserida no mercado de créditos de carbono. Em 2005, o protocolo de Kyoto foi ratificado para considerar essa possibilidade por meio das reduções certificadas de emissão (RCE's) e viabilizar os empreendimentos (ETCHECOIN, 2000).

Em 2009, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução normativa n.º 390 (BRASIL, 2009), que regulamentou o Decreto-Lei n.º 5163 de 2004 (BRASIL, 2004) sobre a Geração Distribuída no Brasil,

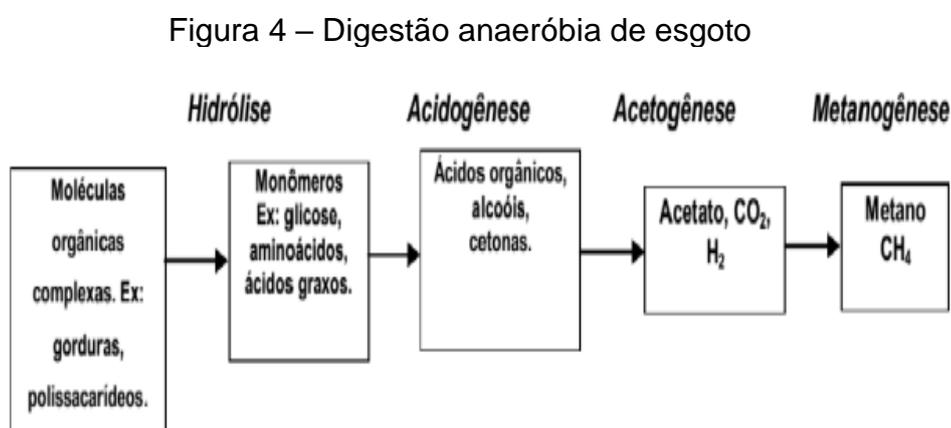
estabelecendo os requisitos necessários à outorga de autorização para a exploração e alteração da capacidade instalada de usinas termelétricas e de outras fontes alternativas de energia. A Geração Distribuída (GD) é aquela realizada por fontes geradoras ligadas diretamente às redes de distribuição de energia de modo a complementar ou integralizar a necessidade do sistema convencional de fornecimento de energia.

2.5 Formação do Biogás

A digestão anaeróbia é um processo executado por algumas espécies de bactérias, que, na ausência de oxigênio, degradam materiais orgânicos complexos em substâncias mais simples como o metano e o dióxido de carbono, mas gerando uma solução aquosa de subprodutos compostos de amônia, sulfetos e fosfatos, extraindo simultaneamente a energia e os compostos necessários para seu próprio crescimento (VAN HAANDEL; LETTINGA, 1994).

No decorrer da fermentação anaeróbia, diversas substâncias químicas são formadas a partir de uma cadeia de degradações sucessivas, executadas por diferentes tipos de bactérias. Em especial, existem duas fases nos processos de fermentação; a primeira é a transformação de moléculas orgânicas em ácidos graxos, sais ou gases; e a segunda é a transformação deles em uma mistura gasosa composta por metano e dióxido de carbono.

A Figura 4 mostra as fases de um processo de digestão anaeróbia ou degradação anaeróbia:



Fonte: Bitton (2005, p.349)

Segundo Chernicharo (2007), vários fatores podem afetar a eficiência da produção de biogás. Os de maior relevância estão citados a seguir:

- a) Composição química do resíduo: substâncias orgânicas facilmente biodegradáveis, como os carboidratos, as proteínas e os lipídeos, são os que proporcionam a maior produção de metano;
- b) Impermeabilidade ao ar: as bactérias produtoras do metano são as anaeróbias. Na presença de oxigênio, a decomposição da matéria orgânica resultará apenas em dióxido de carbono (CO₂);
- c) Temperatura: a variável temperatura tem que ser levada em consideração em função do processo enzimático das bactérias formadoras do gás metano. A 10°C a atividade das bactérias é muito baixa. Acima de 65°C, as enzimas se deterioram pelo calor. O ideal para a produção de biogás é que a temperatura varie entre 32° e 37°C para bactérias mesofílicas e de 50° a 60°C para bactérias termofílicas;
- d) Produção e consumo de ácidos orgânicos: durante a biodigestão anaeróbia o valor do pH está diretamente relacionado à produção de ácidos graxos e à degradação de seus compostos em metano. Quando as condições de digestão anaeróbia são prejudicadas, ocorre aumento da concentração de ácidos voláteis que causam desequilíbrio no processo;
- e) pH: as bactérias que produzem o gás metano têm melhor desempenho quando o pH está entre 6,6 e 7,4. Entretanto, a produção do gás pode ser mantida em pH entre 6,0 e 8,0. A faixa ótima de pH é resultante das diversas reações que ocorrem no processo;
- f) Alcalinidade: é de fundamental importância, pois, conforme as bactérias produzem ácidos e dióxido de carbono, o carbonato/bicarbonato regula o pH, impedindo-o de sofrer grandes flutuações. Quando a quantidade de ácidos voláteis é pequena, a alcalinidade total é quase igual à alcalinidade em bicarbonato. Quando os ácidos voláteis aumentam, eles são neutralizados pela alcalinidade em bicarbonato;
- g) Acidez: diretamente relacionada com o pH e com a alcalinidade. Uma elevada produção de ácidos voláteis pode prejudicar rapidamente a alcalinidade do meio, reduzindo seu pH;
- h) Nutrientes: os principais nutrientes para as bactérias anaeróbias são nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina

e vitamina B12.

2.5.1 Composição dos gases do biogás

As características do biogás dependem da pressão, temperatura, umidade, concentração de metano e concentração de gases inertes e/ou ácidos. Dependendo da utilização, pode ser necessária a redução da concentração de H₂S, CO₂, redução da umidade ou a elevação da pressão. O biogás é composto, em sua maioria, por gás metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), outros gases, como o gás sulfídrico (H₂S), hidrogênio (H₂) e nitrogênio (N₂), estão presentes em concentrações menores. Na Tabela 2, estão os resultados dos valores dessas concentrações.

Tabela 1 – Composição do Biogás

Gás	Símbolo	Concentração no Biogás (%)
Metano	CH ₄	50 – 80
Dióxido de carbono	CO ₂	20 – 40
Hidrogênio	H ₂	1 – 3
Nitrogênio	N ₂	0,5 – 3
Gás sulfídrico e outros	H ₂ S, CO, NH ₃	1 – 5

Fonte: La Farge (1979 apud COLDEBELLA, 2006, p. 74).

O metano (CH₄) é um gás com potencial 21 vezes maior que o dióxido de carbono em relação ao agravamento do efeito estufa e aquecimento global. Sendo assim, o metano produzido no processo de digestão anaeróbia pode causar grande impacto ambiental se liberado na atmosfera; com a sua queima, ocorre a conversão do metano em CO₂ e, conseqüentemente, uma pequena diminuição do impacto ambiental. O gás metano é incolor, inodoro e altamente combustível. Não produz fuligem e seu índice de poluição atmosférica é inferior ao presente no gás de cozinha, o butano (OLIVEIRA; HIGARASHI, 2006).

O ácido sulfídrico (H₂S) ou sulfeto de hidrogênio também é um gás incolor, mais denso que o ar e tem cheiro característico semelhante ao odor de “ovo podre”. É altamente tóxico e irritante, afetando o sistema nervoso, os olhos e vias respiratórias.

Para a geração de energia elétrica, é necessária a remoção de alguns

componentes presentes no biogás, como água, partículas, dióxido de carbono e ácido sulfídrico. O procedimento é chamado de purificação, que consiste em processos de depuração e dessulfurização. A depuração incide na remoção dos componentes indesejáveis, como a água, que gera umidade no interior dos equipamentos. A dessulfurização, por sua vez, consiste em procedimentos à remoção do H₂S contido no biogás gerado (ROHSTOFFE, 2010). A presença desses componentes torna o biogás menos eficiente e, como agravante, o ácido sulfídrico é, além de tóxico, altamente corrosivo em metais e provocaria grandes danos e diminuição da vida útil dos equipamentos utilizados na geração de energia (FRARE, 2006).

2.6 Sistema Híbrido de Geração de Energia Renovável

Os sistemas híbridos geralmente são utilizados para atendimento de consumidores residenciais que estão em região afastada ou isolada da rede elétrica convencional, tendo como função gerar e distribuir eletricidade de forma otimizada e com custos mínimos (LEONI, 2016).

Nogueira (2004), em sua tese, desenvolveu um modelo de projeto para dimensionamento de sistemas energéticos híbridos para áreas rurais isoladas a partir dos recursos naturais renováveis existentes no local, como radiação solar, velocidade do vento, vazão da água e biogás. Os dispositivos de conversão energética foram dimensionados ao considerar a combinação ideal entre os recursos energéticos disponíveis e as cargas elétricas necessárias ao longo de um período de um ano, utilizando módulos fotovoltaicos, geradores eólicos, coletores solares, biodigestores, microcentrais hidrelétricas e baterias de chumbo-ácido.

Em estudo sobre geração híbrida desenvolvido em Bangladesh em 2006, a partir do uso do software HOMER PRO, foi possível modelar um cenário econômico ideal com a utilização de uma combinação de várias fontes de energia: solar, baterias, eólica e diesel. Com a utilização do software, concluiu-se que não era possível utilizar somente fontes renováveis de energia, mas que adotassem, em menor escala, pelo menos, uma fonte não renovável (MAHMUD; HASSAN; RAHMAN, 2013).

Um estudo sobre geração híbrida, como projeto piloto, através de energia

solar e células de combustível, publicado em 2010, para uma área de preservação ambiental em Tocantins usa a energia solar como fonte primária de produção de energia elétrica e a energia excedente é armazenada em hidrogênio proveniente da eletrólise da água; em períodos de escassez solar ocorre a transformação em eletricidade pelas células de combustível (SILVA, 2010).

Em 1986, foi instalado o primeiro sistema híbrido no Brasil, composto de fonte eólica e gerador a diesel, na ilha de Fernando de Noronha e, entre 2014 e 2015, foram inauguradas, segundo Leoni (2016), duas usinas solares nessa ilha. Nessa configuração, economiza-se 400 mil litros de óleo diesel por ano. Em 2014, em Pernambuco, iniciou-se a operação de uma usina híbrida eólica-solar, com capacidade de produzir 17 GWh por ano, suprimindo a demanda de 90 famílias. Outra usina eólica-solar iniciou suas operações em 2016, na Bahia, e possui 19.200 módulos fotovoltaicos e 8 aerogeradores, com capacidade de geração de 12 MW por mês, podendo atender a uma demanda de 130 mil casas (BERNARDES, 2020).

Souza Filho (2019), em sua dissertação, apresentou um projeto de geração de energia renovável solar fotovoltaica e biogás de suinocultura para produção de energia elétrica; a planta híbrida proposta tinha capacidade de gerar 439 MWh com biogás e 253 MWh com a fotovoltaica, o que gerou uma economia anual de energia elétrica da ordem de R\$ 510.000,00/ano.

Sendo assim, existe grande possibilidade de êxito na adequação da proposta híbrida de geração de energia a partir de resíduos e energia solar para uma estação de tratamento de esgotos domésticos; e corroborando para esse êxito está o fato de a região Norte Fluminense possuir grande incidência solar ao longo do ano, com uma média anual de 5,10 kWh/m²; a média nacional anual é 5,42 kWh/m² (INPE, 2021).

2.6.1 Geração de energia por meio de sistema biogás e fotovoltaico

Em um processo de tratamento de esgotos, o biogás é considerado um subproduto, sendo gerado pela decomposição da matéria orgânica que compõe o esgoto ou o lodo. O metano, principal constituinte do biogás, é composto inflamável, inodoro e incolor, com densidade menor que o ar e com alto poder calorífico. A conversão do biogás em energia elétrica ocorre a partir da

conversão da energia química, contida nas moléculas do biogás, em energia mecânica por meio da combustão. Essa energia mecânica é, então, convertida em energia elétrica com a utilização de um gerador (COELHO; VELAZQUEZ, 2006). São três as principais tecnologias disponíveis comercialmente: turbinas a gás, motores a combustão interna e microturbinas; os motores a combustão interna (MCI) acoplados a geradores de eletricidade são a tecnologia mais utilizada na geração de energia elétrica, tendo o biogás como combustível primário.

A utilização de biodigestores anaeróbios são fundamentais no processo de geração de biogás, porque além do biogás, também podem gerar biofertilizante a partir de resíduos que, se descartados no ambiente, poderiam contribuir para a poluição dos recursos hídricos ou aumentando o efeito estufa (ANDRADE NETO, 2001).

Há mais de dois séculos já se tinha notícia da tecnologia de biodigestores para tratamento de rejeitos a partir da fermentação (FERREIRA; SILVA, 2009). Na Figura 5 tem-se a evolução histórica da tecnologia dos biodigestores.

Figura 5 – Evolução histórica da tecnologia dos biodigestores



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Ferreira e Silva (2009).

De acordo com a descoberta do cientista francês Edmond Becquerel em 1839, a conversão fotovoltaica baseia-se no princípio do efeito fotovoltaico. Através de seus experimentos, Becquerel observou que a radiação luminosa poderia ser convertida em energia elétrica mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado numa solução eletrolítica. Em 1954, Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson, da Bell Laboratories, desenvolveram o primeiro protótipo de células fotovoltaicas, produzidas em silício e capazes de converter luz em eletricidade para fazer funcionar alguns equipamentos elétricos (FERREIRA; SILVA, 2009).

Num sistema fotovoltaico, as células solares são as responsáveis pelo funcionamento de um sistema de geração de energia elétrica, pois é nelas que se dá o efeito fotovoltaico, através do qual a radiação solar é convertida diretamente em energia elétrica. Nesse processo, são utilizados materiais semicondutores como o silício, o arseneto de gálio, telureto de cádmio ou disseleneto de cobre e índio, ao qual são adicionados dopantes com o objetivo de criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico (FERREIRA; SILVA, 2009).

Uma década depois, Souza Filho (2019) apresenta resultados promissores ao aplicar um projeto de geração híbrida solar-biogás em uma fazenda de suinocultura e granja na região de Rio Verde em Goiás. Foi possível observar que, com uma quantidade de 12.000 animais alojados, a propriedade foi capaz de gerar 772,20 m³ de biogás por dia e conseqüentemente 1.689,71 kWh por dia, em 11 horas diárias de operação de um grupo gerador. Por fim, o autor concluiu que a produção de eletricidade a partir do sistema solar-biogás na propriedade estudada era viável, levando em consideração um custo para geração de energia de 0,077 US\$. kWh/dia, atingindo um valor de payback de 6,36 anos e possibilidade de comercialização de créditos de carbono para a energia excedente.

Em Uberlândia/MG, Bernardes (2020) desenvolveu, um projeto conceitual de sistema híbrido desconectado da rede de fornecimento da concessionária. Através de cálculos e simulações, demonstrou a viabilidade e rentabilidade do projeto ao observar que com um investimento inicial de R\$ 500.000,00 (quinhentos mil reais) para o biogás e R\$ 350.000,00 (trezentos e cinquenta mil reais) para fotovoltaico foi possível obter um retorno, ao longo de 25 anos, de R\$ 3.200.000,00 (três milhões e duzentos mil reais) para a energia solar e R\$ 1.574.100,00 (um milhão, quinhentos e setenta e quatro mil e cem reais) para o biogás, em termos de economia de energia.

3 METODOLOGIA

3.1 Delineamento da Pesquisa

A fim de atender aos objetivos propostos, este estudo de natureza aplicada (GIL, 2008) tem o intuito de avaliar a viabilidade econômica e ambiental de uma planta híbrida de geração de energia elétrica para unidades de tratamento de efluentes sanitários, por meio dos sistemas biogás e fotovoltaico.

A investigação se caracteriza como uma pesquisa explicativa (GIL, 2008), pois trata a abordagem do processo construtivo, da produção de energia, em aprofundamento de conhecimento com o intuito de contribuir para o desenvolvimento e a proposta de pesquisa.

Em relação aos procedimentos técnicos, foi desenvolvida pesquisa bibliográfica (GIL, 2008) com base em estudos publicados em livros, artigos científicos, revistas e teses relacionadas a temática de produção de energia: utilizando biogás e solar, os tipos de biodigestores existentes, os métodos construtivos, o processo de produção de energia por fermentação do lodo resultante do tratamento do esgoto, de modo que exista correlação de tal conhecimento com as abordagens já publicadas por outros autores.

A abordagem do tratamento da coleta de dados é quantitativa (CRESWELL, 2010), pois exige o uso de dados numéricos onde se observa padrões estatísticos de análise de dados.

Como a bibliometria foi utilizada como um dos métodos de coleta de dados para compor o referencial teórico, na próxima seção são trazidas informações sobre esse método de pesquisa.

3.2 Bibliometria

A bibliometria baseia-se em uma ferramenta quantitativa e estatística que permite medir índices de produção e disseminação do conhecimento, acompanhando o desenvolvimento de diversas áreas científicas, em publicações, padronização de autoria e resultados de investigação. Anteriormente, esse termo foi utilizado em bibliotecas, para fins estatísticos dos estudos, bem como de documentos, periódicos e artigos científicos. Atualmente,

a bibliometria é utilizada para avaliar a produtividade dos autores e realizar estudos de citações (ARAÚJO, 2006).

Em se tratando de pesquisadores e ambientes acadêmicos, a bibliometria é utilizada para análise e avaliação de produções. A avaliação das produções científicas é realizada por meio da aplicação de diferentes indicadores bibliométricos e são fundamentais para promover o reconhecimento dos investigadores junto à comunidade científica e de agências financiadoras (SANCHO, 1990 apud DEFANTI, 2019).

Considera-se que a bibliometria busca organizar as fontes bibliográficas e patentes dos setores científicos e tecnológicos, identificando autores, suas associações e tendências. Através da bibliometria é possível desenvolver mapas de informação de interesse do pesquisador, contribuindo com a busca de dados, avaliando a produtividade e a qualidade da pesquisa dos cientistas, facilitando a percepção do avanço tecnológico da ciência, influenciando diretamente no planejamento e nas ações a serem desenvolvidas (SPINAK, 1998).

3.2.1 Análise Bibliométrica

Vista como um método de pesquisa que visa a busca por leituras mais significativas, a bibliometria tornou-se uma ferramenta de grande relevância para nossa realidade, atenta às necessidades de mudanças de paradigmas (MACHADO JUNIOR *et al.*, 2016).

Os principais métodos de mapeamentos bibliométricos são: análise de citação, mapeamento de cocitação e de acoplamento bibliográfico, método de coautoria e de copalavras (ZUPIC; ČATER, 2014). Na análise de citação é verificada a influência de documentos e autores por meio do quantitativo de citação, embora apresente busca rápida, com elevado número de resultados de artigos acaba não incluindo periódicos recentes. Grande parte dos estudos bibliométricos fornece uma análise de citações do campo de pesquisa, geralmente na forma de ranking das listas dos estudos, autores ou periódicos mais citados na área examinada. Considera-se que citações são usadas como uma medida de influência, isto é, se um artigo é citado muitas vezes, então é considerado importante. Esta proposta se baseia na hipótese de que os autores citam documentos que consideram importantes para o seu trabalho.

A análise de citações pode fornecer informações sobre a influência relativa das publicações, entretanto, falta capacidade de identificar redes de interconexões entre estudiosos (ÜSDIKEN; PASADEOS, 1995).

Os mapeamentos de cocitação e acoplamento bibliográfico utilizam similaridades com base no número de referências compartilhadas ou listadas, sem avaliar a qualidade das referências. A hipótese fundamental da análise de cocitação é que os dois itens que são citados juntos tenham conteúdos relacionados. Diferentes tipos de cocitação podem ser utilizados na análise de cocitação: de documentos, do autor e de periódicos (MCCAIN, 1990).

A cocitação conecta documentos, autores ou periódicos de acordo com a maneira como os escritores os usam. É um princípio de agrupamento rigoroso executado repetidamente por especialistas no assunto que citam publicações que consideram valiosas e/ou relevantes. Ao longo do tempo, as cocitações são úteis para detectar uma mudança nos paradigmas e nas escolas de pensamento (PASADEOS; PHELPS; KIM, 1998).

O método de coautoria mede a colaboração por meio das evidências e da estrutura social do campo, tendo como desvantagem a inclusão de documentos que muitas vezes não apresentam coautoria.

No método de mapeamento copalavras a busca é realizada por meio da interação entre as palavras encontradas nos títulos, palavras-chave ou resumos dos documentos. Embora evidencie o conteúdo dos periódicos por meio das palavras, estas podem apresentar diferentes formas e significados, ou seja, ser subjetiva na análise.

Dependendo do método de mapeamento escolhido, seu uso tem como finalidade revelar a estrutura dinâmica da pesquisa científica e representar o arranjo cognitivo de uma área, ou seja, mapear a ciência.

Os dados para realizar a análise bibliométrica são obtidos em muitos casos em bases de dados de grande abrangência acadêmica e empresarial, inclusive internacional.

3.2.2 Portal de periódicos da Capes

O Portal de Periódicos da Capes é uma biblioteca virtual que reúne um vasto quantitativo de artigos científicos do mundo. O objetivo principal é

disponibilizar para as instituições de ensino e pesquisa do Brasil o acesso às pesquisas científicas. O acervo desse Portal conta com mais de 37 mil títulos com textos completos, 126 bases referenciais, 11 bases que se dedicam exclusivamente a patentes, além de livros, enciclopédias e obras de referência, normas técnicas e conteúdo audiovisual (CAPES, 2022).

3.2.3 Plataforma ORBIT

O Orbit é um sistema de busca e análise de informações contidas em patentes que provê acesso a informações de publicações de patentes em mais de 90 países, com recursos avançados de visualização, exportação e análises de grandes conjuntos de informações. Atualmente, é utilizado por centenas de empresas e instituições no mundo todo, para atividades de suporte à pesquisa e desenvolvimento, construção de plataformas tecnológicas, fusões, aquisições etc.

O Orbit é uma ferramenta comercial com desempenho superior às bases gratuitas, proporcionando a exportação e manuseio de dados em diversas extensões de arquivos, além de possuir uma maior quantidade de conectores e operadores de truncamento (SUZUKI, 2016).

3.2.4 Plataforma INPI

Criado em 1970, o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) é uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), responsável pelo aperfeiçoamento, disseminação e gestão do sistema brasileiro de concessão e garantia de direitos de propriedade intelectual para a indústria. Entre os serviços do INPI, estão os registros de marcas, desenhos industriais, indicações geográficas, programas de computador e topografias de circuitos, as concessões de patentes e as averbações de contratos de franquia e das distintas modalidades de transferência de tecnologia. Na economia do conhecimento, estes direitos se transformam em diferenciais competitivos, estimulando o surgimento constante de novas identidades e soluções técnicas (INPI, 2022).

3.2.5 Plataforma ESPACENET

O Espacenet é uma plataforma de referência para dados especializados na recuperação e pesquisa de documentos de patentes e representa uma das fontes de informação tecnológica mais importantes para a vigilância tecnológica e inteligência estratégica, foi desenvolvido pelo Escritório Europeu de Patentes (EPO) e permite a pesquisa e análise de mais de 110 milhões de documentos de patentes de todo o mundo, de maneira gratuita (INPI, 2022).

3.3 Estratégia de Buscas na Base de Dados CAPES e nas Plataformas ORBIT, INPI E ESPACENET

Para a realização deste trabalho foram levantados os dados de registros de patentes, artigos e teses referentes às tecnologias de geração híbrida de energia, nas bases do portal de periódicos da CAPES e em ferramentas de busca de patentes dos ambientes ORBIT, INPI e ESPACENET, acessados no período compreendido entre 06 de setembro 2021 e 13 de setembro de 2021. Em todas as bases de pesquisa, a busca foi feita de forma avançada utilizando os operadores booleanos. A estratégia de busca (query), tanto nas bases de dados, quanto nas bases de patentes, consistiu em utilizar o operador booleano “AND”, associado a determinadas palavras-chave, limitando-se aos campos, título, resumo e palavras-chave. Além disso, foi utilizada como delimitação temporal o período compreendido entre 2011 a 2021. Abaixo é apresentada a forma como utilizamos as expressões de busca nas diversas plataformas.

Energia AND Híbrida AND Fotovoltaico AND Biogás AND Efluentes;

Energy AND Hybrid AND Photovoltaic AND Biogas AND Efluents.

Os documentos obtidos passaram por um processo de triagem que consistiu na análise do título e resumo do trabalho. A partir dessa leitura, pôde-se observar quais trabalhos estavam relacionados à proposta e quais não possuíam foco que contribuiria para a pesquisa.

Cada tipo de documento passou por um respectivo processo de triagem após a análise do título e resumo dos trabalhos. O critério de seleção adotado para as patentes consistiu em considerar as três patentes mais citadas e as três patentes mais recentes. Para os artigos em periódicos e para as dissertações consideramos os dez (10) mais citados no referido período.

3.4 O Locus da Pesquisa

O presente trabalho utilizou como estudo de caso uma estação de tratamento de esgotos da empresa de saneamento Águas do Paraíba, que atualmente é a empresa que explora os serviços de fornecimento de água e tratamento de esgotos em Campos dos Goytacazes, no Estado do Rio de Janeiro.

Antes da chegada da concessionária, em 1999, a cidade de Campos dos Goytacazes não contava com tratamento de esgoto e a água chegava para a população de forma intermitente. Em 2022, a população é atendida por 39 sistemas produtores de água, que abastecem 70 localidades através de 1.257 quilômetros de adutoras e redes de água.

A empresa é integrante do grupo Águas do Brasil e, devido aos investimentos realizados, ficou em 4º lugar em saneamento no estado do Rio de Janeiro, segundo o último ranking (TRATA BRASIL, 2022) divulgado pelo Instituto Trata Brasil.

Em 2004, a concessionária implantou na cidade, no bairro da Chatuba, a primeira ETE com nível terciário de tratamento do esgoto, que remove mais de 97% das impurezas do efluente e, em função do tamanho e capacidade de tratamento dos efluentes, essa unidade foi a selecionada para o presente projeto, além de já possuir uma estrutura compacta de biodigestor acoplado ao sistema.

3.5 Visita Técnica

Para o desenvolvimento deste trabalho se fez necessário realizar cinco visitas técnicas à empresa Águas do Paraíba localizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ. As visitas foram realizadas no período compreendido entre

outubro de 2021 e agosto de 2022.

Na referida empresa fui recebido pelo gerente operacional, engenheiro responsável pela área de tratamento de efluentes, que apresentou, na primeira visita técnica, todo o corpo técnico responsável pela estação de tratamento, onde pude conhecer com mais detalhes o funcionamento da mesma. Na segunda visita, foi apresentada a minha proposta de TCC para o aproveitamento do biogás gerado no tratamento do esgoto que é recebido na ETE para geração de energia elétrica em conjunto com sistema fotovoltaico. Na terceira visita técnica, a ida a ETE foi para avaliação do local de implantação do projeto. A quarta visita consistiu na identificação dos melhores sistemas de geração de energia a serem empregados. E finalmente, na quinta visita técnica, deu-se a apresentação de custos dos materiais, equipamentos e serviços necessários para a implementação do projeto. A Figura 6 mostra a estação de tratamentos de esgotos ETE Chatuba.

Figura 6 – ETE Chatuba



Fonte: Águas do Paraíba (2021).

A visita técnica às instalações da empresa trouxe informações relevantes quanto à compreensão dos processos necessários para o tratamento de efluentes, bem como sua necessidade energética. Outro ponto discutido foram

os tipos de equipamentos necessários para a implantação do projeto de geração de energia elétrica, os inversores e módulos do sistema fotovoltaico, o tipo de motor a biogás para trabalhar em máxima eficiência considerando a taxa de compressão e a concentração do gás metano (CH₄) encontrado no biogás.

3.6 Técnica de Coleta de Dados

Para a correta apuração dos resultados esperados, definiu-se a carga que o sistema precisará atender, selecionando o tipo de carga como “comercial”.

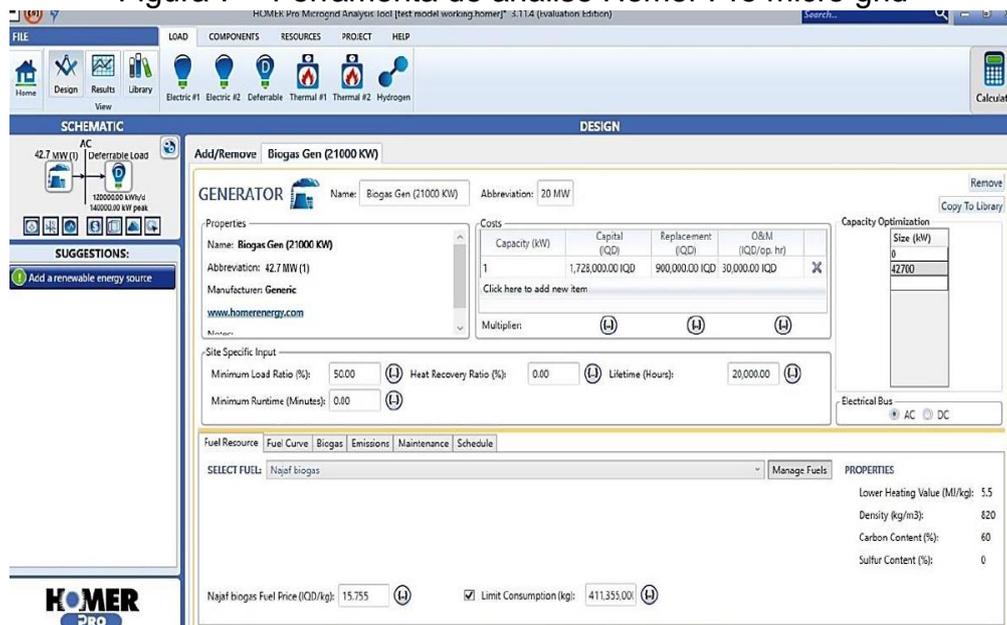
Para o sistema com biogás, os dados de entrada, do software, exigiram a informação de qual tipo de moto-gerador seria utilizado; para o sistema fotovoltaico também foi necessário selecionar os modelos de placas fotovoltaicas e inversores do sistema para que fosse possível a simulação.

Com isso, foi possível determinar, no sistema fotovoltaico, a capacidade nominal do painel fotovoltaico em kW e a quantidade de energia média do painel ao longo do ano, em kWh/ano. No sistema biogás, estimou-se o tempo total de funcionamento do moto-gerador durante o ano, a quantidade de combustível consumido pelo gerador durante o ano e a energia produzida pelo gerador, em kWh.

3.7 Técnica de Análise de Dados

A escolha do software Homer Pro foi decorrente da pesquisa bibliométrica da dissertação de Souza Filho (2019). O Homer Pro é um programa de modelagem computacional desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis americano (NREL) do Departamento de Energia dos Estados Unidos (EUA), é de licença paga e capaz de projetar a configuração dos componentes de um sistema de geração híbrido da forma mais otimizada e econômica possível (MAHMUD; HASSAN; RAHMAN, 2013). A Figura 7 mostra o painel de configurações dos parâmetros de funcionamento do software, onde se faz necessário fazer o *input* de dados básicos, como necessidade energética, localização geográfica e etc.

Figura 7 – Ferramenta de análise Homer Pro micro grid



Fonte: Própria (2022).

Neste estudo, foi utilizado o programa HOMER PROx64 em função do algoritmo de análise de sensibilidade e de otimização que permite a avaliação da viabilidade técnica e econômica de uma grande variedade de opções tecnológicas, incluídas a variação de custos e a disponibilidade das fontes de energia para avaliar opções de projetos em sistemas com fontes de energia conectadas à rede (WOTTRICH, 2010; MACHADO, 2013).

A partir dos resultados gerados pelo software Homer Pro, foi possível avaliar a capacidade de suprimento de energia elétrica, por meio das fontes renováveis selecionadas, necessária para o funcionamento da estação de tratamento de esgoto escolhida para o estudo. Também foi possível estimar uma métrica para a geração de biogás proveniente do tratamento do esgoto e uma métrica para a geração fotovoltaica na estação (ETE) estudada.

Na elaboração do relatório técnico para a empresa demandante, foi possível esclarecer os principais aspectos da tecnologia de geração de energia apresentada, assim como o valor estimado a ser economizado para custos de operação do empreendimento. No Anexo I apresentamos a carta de demanda da empresa Águas do Paraíba.

4 RESULTADOS

4.1 Análise Bibliométrica

Após as buscas realizadas no Portal de Periódicos da CAPES e nas plataformas ORBIT, INPI e ESPACENET, foram identificados 645 documentos relacionados às tecnologias de geração de energia híbrida, sendo 10 documentos de patentes no ESPACENET, 602 no ORBIT, 01 no INPI e 14 teses/dissertações, 12 livros e 6 artigos na base CAPES.

Levamos em consideração as três patentes mais citadas e as três patentes mais recentes na base ESPACENET, ressaltando que as três patentes mais recentes também foram as mais citadas. O pedido de patente mais recente e mais citado tem como número de depósito CN212610187U (LIJUAN *et al.*, 2021) e trata de um sistema que compreende uma unidade de produção de energia fotovoltaica, uma unidade de produção de biogás e uma unidade de fornecimento de energia e calor a biogás. A extremidade de saída de um transformador tipo caixa da unidade de produção de energia fotovoltaica é ligada eletricamente a uma rede de distribuição de energia e uma caixa de distribuição de energia da unidade de produção de metano, um tanque de armazenamento de gás da unidade de produção de metano é ligado a uma caldeira a gás da unidade de fornecimento de energia e calor a metano, e um permutador de calor da unidade de fornecimento de energia e calor a metano é ligado à unidade de utilização de calor.

O segundo pedido de patente mais recente e mais citado tem como número de depósito CN210041418U (XIN; JING, 2021) detalha um dispositivo que se caracteriza como um sistema que inclui um painel fotovoltaico, um gerador de biogás e um digestor de biogás. O painel fotovoltaico é ligado a um controlador de produção de energia fotovoltaica através de um fio. O controlador de produção de energia fotovoltaica e o gerador de biogás são ligados à estação de junção através de fios; o dispositivo de confluência é ligado com um inversor através de um fio, o digestor de biogás é ligado com um gerador de biogás através de uma tubagem de biogás e mais ligado com um aquecedor elétrico de água de biogás através de uma tubagem de biogás, o aquecedor elétrico de água de biogás é comunicado com um conjunto de circulação de água quente utilizado

para o aquecimento de chorume de biogás no digestor de biogás através de uma tubagem de água, e um conjunto de fusão da neve utilizado para o aquecimento da neve acumulada na placa fotovoltaica.

O terceiro pedido de patente mais recente e mais citado tem como número de depósito CN204900061U (MINGLI *et al.*, 2015). O modelo de utilidade caracteriza-se por um dispositivo de energia de biogás em coordenação com um dispositivo fotovoltaico, onde a saída da quantidade elétrica do dispositivo fotovoltaico é ligada à bateria a partir da concatenação em DC/AC do conversor e do dispositivo fotovoltaico. O modelo de utilidade revela que, ao ser ligado à linha de transmissão de energia simultaneamente com o dispositivo fotovoltaico e ao dispositivo de biogás e a bateria, pode poupar a respectiva energia, atingindo a elevada eficiência e utilizando a energia fotovoltaica e a energia do gás dos pântanos.

Na busca por artigos sobre o tema, optou-se pelos dez mais citados da base do Portal de Periódicos da CAPES. Dentre eles, destacamos os três mais pertinentes ao assunto.

Jumare, Bhandari e Zerga (2020) analisaram um sistema descentralizado de energia fotovoltaica, eólica e híbrida de biogás no norte da Nigéria. Descreve a avaliação detalhada de um sistema de energia híbrido fotovoltaico/eólico/biogás ligado à rede na parte norte da Nigéria, utilizando um Modelo Híbrido Combinado de Otimização para Renováveis Elétricos.

Outro artigo em destaque trata do potencial de flexibilidade de uma central fotovoltaica e sistemas híbridos em uma central de biogás na rede de distribuição. Nele foi analisado o potencial de combinação de centrais de biogás e fotovoltaicas em sistemas híbridos na rede de distribuição alemã. O foco do referido artigo é o equilíbrio do fornecimento intermitente de energia das centrais fotovoltaicas com a produção de energia controlável de unidades de Produção Combinada de Calor e Eletricidade (PCCE) de centrais de biogás num período de segundos (BÄR *et al.*, 2020).

Já o artigo intitulado *Análise de viabilidade e sensibilidade de um sistema de energia híbrida de micro-hidro-fotovoltaicos-biomassa e biogás-diesel-bateria fora da rede*, para uma área remota no estado de Uttarakhand na Índia, aborda o estudo de viabilidade técnico-econômica de um sistema energético híbrido biogás-diesel-bateria (HES) em modo off-grid para uma zona rural daquele

estado (BHATT; SHARMA; SAINI, 2016).

Na seleção das dissertações e/ou teses mais citadas e recentes, realizada no Portal de Periódicos da CAPES, destacamos uma dissertação sobre a viabilidade econômica da geração distribuída com biogás aplicada ao meio rural, que se propunha a implementar um estudo de caso para estimar a viabilidade econômica de um projeto de autossuficiência energética em zonas rurais, aproveitando os biodigestores e sol em abundância para produzir energia elétrica (BERNARDES, 2020).

Outra dissertação em destaque trata da análise de viabilidade do sistema híbrido biogás-solar na geração de energia e seus impactos nas emissões de gases, que teve como objetivo avaliar o uso de um sistema híbrido fotovoltaico-biogás conectado à rede em uma propriedade rural no estado de Goiás (SOUZA FILHO, 2019).

Por fim, na dissertação intitulada “*Projeto de um sistema híbrido fotovoltaico com microgeração hidráulica para consumidor isolado*” foi realizado um estudo de viabilidade de um sistema de geração de energia híbrida fotovoltaica isolada com microgeração hidráulica (GODOI, 2018).

4.2 Apresentação do Consumo e Custos com Energia Elétrica da ETE Chatuba

A unidade da concessionária Águas do Paraíba, Estação de Tratamento Chatuba – ETE Chatuba, registrou em 2021, uma demanda operacional de potência da ordem de 450 kW.

De acordo com a Resolução n.º 414/2010 da Aneel (ANEEL, 2010), para unidades que possuem a somatória de todos os motores e cargas elétricas superiores a 300 kW, torna-se compulsória a aplicação da modalidade de tarifa específica para grandes consumidores, denominada tarifa horo-sazonal. A tarifa horo-sazonal caracteriza-se por ter tarifas diferenciadas, variando de acordo com as horas do dia, conforme períodos do ano. Nessa conjuntura, a critério das condições operacionais do usuário, é possível optar por dois segmentos: a modalidade horo-sazonal verde ou horo-sazonal azul. O horário denominado horário de ponta corresponde a três horas, quando o valor da tarifa de consumo em KWH é mais alto, normalmente, das 18h às 21h. Atualmente, a ETE Chatuba

está classificada na modalidade horo-sazonal verde. No horário de ponta, o custo da energia é 7 vezes maior que no horário fora de ponta, para unidades classificadas como saneamento, conforme tarifas informadas na Resolução Aneel n.º 1.158/2011(ANEEL, 2011).

Os dados obtidos e empregados neste trabalho foram retirados das faturas de energia elétrica, emitidas mensalmente pela concessionária de energia elétrica. Levantou-se o histórico de consumo de energia e o respectivo histórico de custos dessa unidade, separados pelos valores em kW, kWh e em reais, relativo ao consumo no horário de maior custo, denominado de horário de ponta e no horário fora de ponta.

A Tabela 3 apresenta o consumo de energia elétrica do ano de 2021 da ETE Chatuba, sua operação no horário de ponta, fora de ponta, valores de consumo em kW e kWh, custo em reais mensal, anual e o número de horas de operação.

Tabela 2 – Dados de consumo de energia e custos da ETE Chatuba em 2021

Mês	Dem.Ponta	Dem. F.Ponta	Horas op. Ponta	kWh ponta	Custo em R\$ ponta	kWh F.ponta	kWh total	Custo em R\$ total	h.fora ponta	horas op.mês
1	329	367	49,9	11.311	23.526,62	58.339	69.650	59.696,83	506,4	556
2	354	373	41,8	9.615	19.999,49	50.404	60.019	51.249,79	420,5	462
3	320	362	37,1	8.295	17.253,10	49.874	58.169	48.175,03	417,1	454
4	325	409	34,2	8.673	18.038,94	52.699	61.372	50.712,58	385,8	420
5	361	361	40,3	9.199	19.134,60	59.219	68.418	55.850,12	464,7	505
6	369	369	48,1	11.236	23.370,95	65.236	76.472	63.817,13	522,4	571
7	362	362	46,8	10.951	22.777,77	65.004	75.955	63.080,43	519,6	566
8	366	366	51,2	12.251	25.483,08	63.908	76.159	65.105,82	498,1	549
9	379	379	49,7	12.329	25.644,34	71.244	83.573	69.815,32	541,7	591
10	407	407	45,2	12.054	25.072,11	67.859	79.913	67.144,87	475,7	521
11	417	417	43,8	11.959	24.874,55	72.528	84.487	69.841,70	498,8	543
12	400	422	51,1	13.829	28.764,95	70.007	83.836	72.169,06	496,3	547
Valores médios			44,9	10.975	22.828,38	62.193	73.168	61.388,22	478,925	524
Valores Totais			539,2	131.702	273.940,50	746.320	878.022	736.658,68	5.747	6.286

Fonte: Adaptado de Águas do Paraíba (2021).

Podemos observar a partir da Tabela 3, períodos de menor necessidade energética entre os meses de fevereiro a abril, provavelmente em função do esvaziamento da população da cidade, que nesse período se desloca com frequência para o litoral.

4.3 Medições de Vazão de Biogás

Estabeleceram-se medições em nove dias de 2021. Para a avaliação da vazão do biogás, conectou-se ao ponto de saída empregado para a coleta das amostras de biogás uma mangueira flexível fixada a uma régua vertical graduada em centímetros, cujas dimensões são conhecidas pela medição direta. Considerou-se a vazão de saída para o queimador (Q_q) proporcional a saída do gás nessa derivação (Q_d), por estarem em mesmas condições ambientais. Pelo volume de saída de um trecho específico da mangueira graduada, mediu-se, o tempo (t) de deslocamento (d) de uma esfera dentro da mangueira. Pelo volume conhecido no segmento específico e a velocidade o gás, obteve-se a vazão de referência. Pela regra de proporcionalidade entre os diâmetros das tubulações tem-se a vazão de saída. Na Tabela 4 estão demonstrados os dados obtidos, produzidos na ETE Chatuba no biodigestor existente.

Tabela 3 – Parâmetros para avaliação da vazão do biogás da ETE Chatuba

Dia/mês	d[m]	Q[m³]	t[s]	T[°C]	Qd[m³/h]	Qq[m³/h]	Qsaída[m³/h]
28/10	0,3	0,000037	0,19	31,4	0,709	25,52	19,21
31/10	0,3	0,000037	0,28	24,5	0,481	17,31	16,98
01/11	0,3	0,000037	0,5	23,1	0,269	9,70	9,75
03/11	0,3	0,000037	0,4	25,0	0,337	12,12	11,46
05/11	0,3	0,000037	0,43	26,0	0,313	11,27	10,25
06/11	0,3	0,000037	0,46	26,5	0,293	10,54	9,58
07/11	0,3	0,000037	0,34	22,0	0,396	14,26	15,32
08/11	0,3	0,000037	0,36	24,0	0,374	13,47	13,26
09/11	0,3	0,000037	0,38	25,0	0,354	12,76	12,06
Vazão Média							13,10

Fonte: Adaptado de Águas do Paraíba (2021).

Para fins de cálculo, será adotado o valor arredondado para $Q=13,0$ m³/h para a produção de biogás no biodigestor já existente na ETE, mas em menor escala.

Essa unidade apresentou nos últimos meses uma vazão mínima de 119 l/s, vazão média de 135 l/s e vazão máxima de 162 l/s, conforme os boletins operacionais da unidade. Considerando pelo valor médio de entrada de esgoto de 486 m³/h e o volume de biogás medido de 13 m³/h, têm-se um potencial de produção de 0,0535m³ (53,3 litros) de biogás para cada m³ (1000 litros) de

esgoto recebido de entrada.

4.3.1 Equivalência entre o potencial de biogás e energia elétrica em kwh

Através da utilização do software Homer Pró, foi possível determinar o potencial calorífico do biogás (kcal/kg) para o potencial calorífico em kWh/m³, empregando-se a equação 01, a qual realiza a transformação direta para a determinação em energia por metro cúbico de biogás.

$$PCI_d = PE \times PCI \times K \text{ (equação 1)}$$

Onde,

PCI_d = Potencial Calorífico Inferior disponível em kWh/m³;

PE = Peso Específico em kg/Nm³;

PCI = Potencial calorífico inferior em kcal/kg

$K = 4,19 \text{ kWh}/3600$. Constante de conversão entre kcal > kJoules > kwh

Foi utilizado o valor de eficiência global de 25% para a conversão nas máquinas térmicas, com grupos geradores (motores ciclo Otto), conforme CCE (2000 apud SOUZA *et al.*, 2004). Pela equação 2, determinou-se a potência elétrica final a ser disponibilizada.

$$P = PTB \times PCI_d \times 0,25 \text{ (equação 2)}$$

Onde,

P = Potência Elétrica Disponibilizada, kW;

PTB = Produção total de biogás, m³/h;

PCI_d = Potencial Calorífico Inferior disponível em kWh/m³.

O valor mensal total de energia elétrica possível de ser fornecido para o consumo final, está demonstrado pela equação 3.

$$E = P \times h \times m \text{ (equação 3)}$$

Onde,

E = Energia elétrica total disponibilizada pelo biogás, kWh/mês;

h = 24 horas = 1 dia

m = 30,4167 dias do mês (considerado para um período anual)

O poder calorífico do biogás depende da relação dióxido de carbono e metano, ou seja, quanto maior a concentração do metano, maior o poder calorífico. A Tabela 5 apresenta a variação do poder calorífico do biogás e a respectiva densidade para determinada composição do biogás.

Tabela 4 – Variação do poder calorífico em relação à composição do biogás

Composição Química do Biogás	Peso Específico (kg/Nm³)	P.C.I. (kcal/kg)
10% CH ₄ , 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ , 60% CO ₂	1,4643	2.338,52
60% CH ₄ , 40% CO ₂	1,2143	4.229,98
65% CH ₄ , 35% CO ₂	1,1518	4.831,14
75% CH ₄ , 25% CO ₂	1,0268	6.253,01
95% CH ₄ , 5% CO ₂	0,7768	10.469,60
99% CH ₄ , 1% CO ₂	0,7268	11.661,02

Fonte: Lannicelli (2008 apud ZILOTTI, 2012).

De acordo com a Tabela 5, a composição química do biogás pode variar de 10% a 99% de concentração de CH₄. Geralmente o biogás gerado do esgoto possui uma concentração máxima de 75% de CH₄, sendo suficiente para a aplicação a que o projeto se propõe.

4.3.2 Avaliação dos gases presentes nas amostras realizadas

A Tabela 6 mostra os dados obtidos das análises das amostras de biogás retirados do biodigestor anaeróbio da ETE Chatuba.

Tabela 5 – Caracterização dos parâmetros das amostras de biogás na ETE Chatuba

N.	Data	Horário Coleta	Concentração de Gases			
			CH ₄ [%]	CO ₂ [%]	H ₂ S [ppm]	NH ₃ [ppm]
1	15/10/2021	16:30	73	27	20	40
2	17/10/2021	14:40	77	23	230	40
3	18/10/2021	14:40	75	25	460	30
4	19/10/2021	15:10	80	20	460	40
5	24/10/2021	14:40	77	23	530	175
6	25/10/2021	14:55	70	30	40	175
7	26/10/2021	14:30	73	27	40	85
8	27/10/2021	16:00	75	25	40	350
9	28/10/2021	14:28	73	27	40	85
10	31/10/2021	14:58	75	25	20	350
11	31/10/2021	15:28	77	23	20	175
12	01/11/2021	09:50	73	30	152	175
13	01/11/2021	14:20	75	25	152	45
14	03/11/2021	14:45	75	25	152	175
15	03/11/2021	14:45	77	23	350	350
16	11/11/2021	14:40	75	25	350	175
17	11/11/2021	14:40	75	25	460	175
18	16/11/2021	14:35	73	27	175	175
19	16/11/2021	14:35	73	27	350	175
20	17/11/2021	15:15	75	25	175	175
Valores Médios			74,8	25,35	210,8	158,25

Fonte: Adaptado de Águas do Paraíba (2021).

Conforme consta na Tabela 6, os valores médios das amostras do biogás do biodigestor, foram para o Gás Metano-CH₄ [%] de 74,8%, Gás Carbônico-CO₂ [%] de 25,35%, a concentração de sulfeto de hidrogênio (gás sulfídrico) foi de 210,8 ppm e a concentração de amônia foi de 158,25 ppm no biogás produzido.

De acordo com a Tabela 5, classificou-se o biogás encontrado com um poder calorífico inferior - PCI de 6.253,01 kcal/kg e uma densidade de 1,0268 kg/Nm³. Segundo Coelho *et al.* (2006), foram encontrados valores semelhantes das concentrações para o gás Metano (CH₄) de 66,5%, para o dióxido de carbono (CO₂) de 30,5% e para o gás sulfídrico foi de 134 ppm. A mesma autora estimou o poder calorífico inferior próximo de 5.300 kcal/Nm³.

4.3.3 Avaliação do potencial do biogás da ETE Chatuba e sua conversão em energia elétrica

Os resultados obtidos utilizando-se o software *Homer Pro* indicam uma potência de P = 24,28 kW disponível à uma produção de 13 m³/h de biogás e

uma geração máxima de energia de 17.730 kWh/mês, considerando a condição de produção de metano de forma contínua. Foram desconsideradas as variações nas concentrações de material orgânico decorrentes de determinados meses do ano, como os períodos de altas condições pluviométricas nas galerias de esgoto, que interferem na produção dos gases e de suas concentrações. O custo médio mensal evitado na compra de energia elétrica, da concessionária de energia, seria de R\$ 15.070,50/mês e R\$ 180.846,00/ano.

4.3.4 Investimentos em Máquinas e Equipamentos para o sistema Biogás

Em função da capacidade máxima de geração de biogás na ETE Chatuba, os cálculos utilizando o software (Homer Pro) indicaram a utilização de motorizador de 150 kVA, potência nominal de 75 kVA, tensão nominal de 127/220/380 V, em regime de funcionamento contínuo e rotação de 1800 rpm, refrigerado a água com sistema elétrico de 24 Vcc (Tabela 7).

Tabela 6 – Investimentos fixos do sistema movido a Biogás

Descrição	Custo (R\$)
Gerador Biogás 150 KVA - 60 Hz (01 unidade)	157.972,25
Aquisição lona para 01 Biodigestor - 2300 m ³ em PVC	87.560,15
Obras de Alvenaria e Concreto para a construção dos Biodigestores	83.456,30
Terraplanagem e aterro para construção do Biodigestor	72.217,50
Limpeza e Manutenção dos Biodigestores (3 vezes em 25 anos)	32.580,25
Aquisição de cabos elétricos e interligação do grupo gerador a rede	32.380,00
Substituição de Trafo	52.811,50
Projeto Elétrico de Geração Distribuída	32.885,00
Custos Totais	551.862,95

Fonte: Próprio autor (2022).

4.4 Avaliação do Potencial Fotovoltaico da ETE Chatuba e sua Conversão em Energia Elétrica

Segundo dados encontrados no portal do INPE (2021), a região de Campos dos Goytacazes-RJ, possui uma irradiação de 5,10kWh/m²/dia. Sendo assim, através dos dados inseridos no software Homer Pro, foi possível estimar o atendimento de uma demanda de 16.125 kWh/mês para essa unidade

consumidora com um sistema fotovoltaico de 72,6 kWp, composto de 220 módulos com potência de 300 Wp. O custo médio mensal evitado na compra de energia elétrica, da concessionária de energia, seria de R\$ 13.706,25/mês e R\$ 164.475,00/ano.

4.4.1 Investimentos em Máquinas e Equipamentos para o sistema Fotovoltaico

O investimento inicial no sistema fotovoltaico está demonstrado conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Investimentos fixos do sistema fotovoltaico

Descrição	Custo (R\$)
Painel Solar Jinko JKM340M-60HL4-V 60M 20,85% EFIC MONO(220 unidades)	191.400,00
INVERSOR GROWATT ON GRID MAX75KTL3-LV 75KW TRIF 380V (01 unidade)	47.555,00
ESTRUTURA SOLAR GROUP ASMTC240X000MD04	32.743,75
STAUBLI CONEC MC4 320016P0001-UR PV-KBT4/6II-UR ACOPLADOR FEMEA	20.630,90
STAUBLI CONEC MC4 32.0017P0001-UR PV-KST4/6II-UR ACOPLADOR MACHO	20.630,90
CABO SOLAR NEXANS 40023 ENERGYFLEX AFITOX 0,6/1KV 1500V DC PRETO	30.395,75
CABO SOLAR NEXANS 47819 ENERGYFLEX AFITOX 0,6/1KV 1500V DC VERMELHO	30.395,75
Custos Totais	373.752,05

Fonte: Próprio autor (2022).

A Tabela 7 demonstra os investimentos necessários para a montagem do sistema fotovoltaico; os levantamentos foram feitos através de cotações realizadas aos principais fornecedores/revendedores do mercado nacional com os menores preços.

4.5 Resultados da Viabilidade Econômica

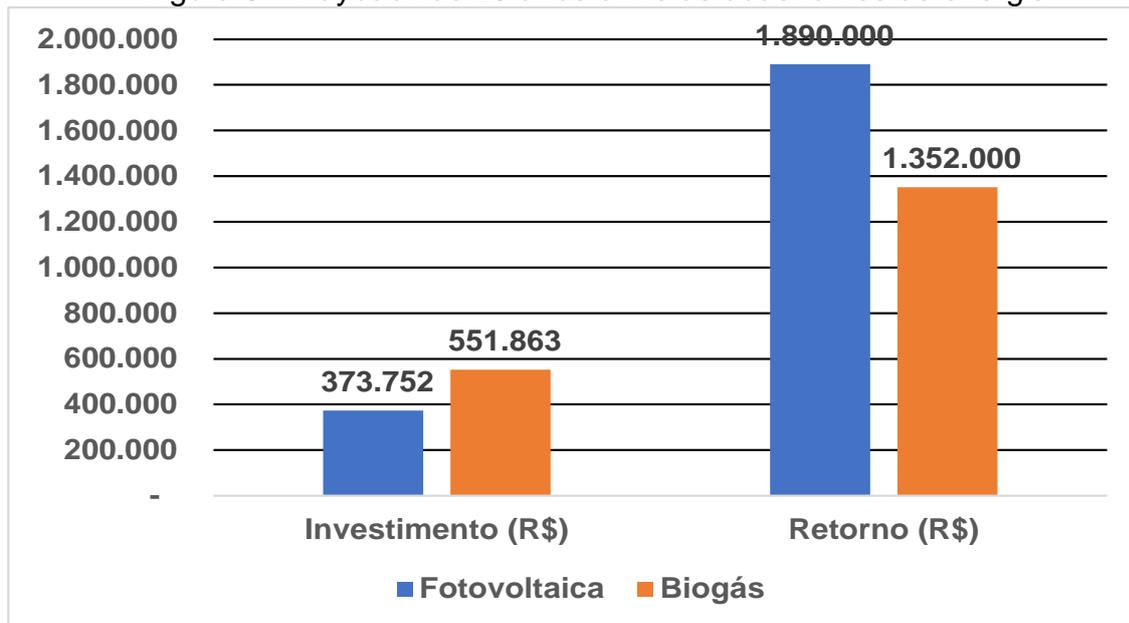
Os custos associados a sistemas híbridos podem ser divididos em dois

grupos: os custos de despesa e os custos de receita. Os custos de receita estão normalmente associados ao lucro obtido com a venda da energia gerada ou a uma economia resultante da redução no consumo ou de outras taxas. Já os custos de despesas podem ser relacionados aos custos do investimento inicial, os custos de operação e manutenção (O&M) e aos custos de reposição de equipamentos (SOLARBUZZ, 2008).

A Figura 8 mostra um gráfico representado ao longo de 25 anos, o retorno do investimento em comparativo com o investimento de implantação tanto de biogás, quanto de fotovoltaico. Na coluna investimento, demonstra o valor do projeto para implantação tanto de biogás, que é de R\$ 551.862,95 (quinhentos e cinquenta e um mil, oitocentos e sessenta e dois reais e noventa e cinco centavos), quanto do fotovoltaico de R\$ 373.752,05 (trezentos e setenta e três, setecentos e cinquenta e dois reais e cinco centavos). Em outra coluna, refere-se ao retorno do investimento ao longo de 25 anos de funcionamento. O prazo de 25 anos foi considerado para o retorno do investimento, tendo em vista a garantia de funcionamento pleno do sistema. O retorno demonstrado na figura 8 foi calculado considerando o valor economizado com a geração de energia, anualmente, levando-se em conta uma taxa de inflação energética média anual de 10,80%. O software também calculou a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 15,94% ao ano e um dispêndio com manutenção anual de R\$ 2.000 (dois mil reais) para a planta fotovoltaica e R\$ 3.000 (três mil reais) para o biogás.

Cada fonte de energia, em média, gerará uma economia de R\$ 170.000,00 (cento e setenta mil reais) ao ano. O tempo de retorno para pagamento de todo o sistema seria em média de três anos, considerando os valores mensais descontando o valor investido que seria em torno de R\$ 925.615,00 (novecentos e vinte cinco, seiscentos e quinze reais).

Figura 8 – Payback de 25 anos entre as duas fontes de energia



Fonte: Próprio autor (2022).

4.6 Resultado da Redução da Emissão de Gás Tóxico (CO₂) ao Meio Ambiente

Buscando mensurar de forma eficaz os resultados da redução de emissões de gases do efeito estufa, utilizou-se a ferramenta de cálculo disponibilizada pelo Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) em parceria com a Fundação Getúlio Vargas (FGV), do programa Fundo Clima (BNDES, 2016).

Com a aplicação da ferramenta, que utilizou como parâmetros a capacidade de geração de energia a ser instalada (33.855 kWh/mês), a vida útil dos equipamentos (25 anos), e o volume do biogás gerado (13 m³/h), estima-se uma redução de mais de 800.000 toneladas de CO₂ ao longo de 25 anos e 31.590 toneladas de emissões evitadas pela queima do metano (CH₄).

5 CONCLUSÕES

O conceito de sistema híbrido remonta a descentralização e diversificação da matriz energética, apresentando-se como uma oportunidade, tanto de fornecimento de energia quanto para mitigação dos impactos ambientais intrínsecos à atividade de saneamento. Sendo assim, este estudo objetivou, em poucas palavras, demonstrar o retorno do investimento econômico de sistemas híbridos com biogás e energia solar fotovoltaica.

Uma das primeiras etapas do projeto consistiu na escolha do Biodigestor. Através dos estudos e cálculos auxiliados pelo software Homer Pro, chegou-se à conclusão que seria melhor o modelo de biodigestor Canadense, pela facilidade de manutenção e custo.

Através de cálculos e simulações por meio do software Homer Pro, foi demonstrada a funcionalidade do sistema, bem como sua viabilidade e rentabilidade através da geração distribuída conectada à rede de distribuição da fornecedora de energia local.

Concluiu-se através desse estudo que ao aplicar um investimento inicial de R\$ 550.000,00 (quinhentos e cinquenta mil reais) para biogás e R\$ 370.000,00 (trezentos e setenta mil reais) para o fotovoltaico, foi possível simular uma economia de energia de R\$ 1.890.000,00 (um milhão, oitocentos e noventa mil reais) para energia solar e R\$ 1.352.000,00 (um milhão, trezentos e cinquenta e dois reais) para o biogás ao longo de 25 anos.

Em relação às reduções dos gases do efeito estufa (GEE), conclui-se que é possível capturar 571.644 toneladas de carbono (CO₂) no projeto com o biogás e 230.170 toneladas de carbono (CO₂) com o projeto fotovoltaico.

As análises químicas do esgoto mostraram que quanto mais matéria orgânica e irradiância na região onde será implantado o sistema, maior será a produção de energia. Sendo assim, percebe-se que o biogás produzido pelo biodigestor da ETE Chatuba apresentou potencial para o aproveitamento para geração de energia. O dimensionamento de um sistema de biogás precisa levar em consideração a quantidade de matéria orgânica para a geração de energia elétrica, entretanto, o sistema fotovoltaico é baseado no posicionamento da região ao longo do globo terrestre, sendo assim, levou-se em consideração a latitude da edificação e o nível de irradiância.

A geração distribuída vem se destacando no cenário da geração convencional de energia elétrica, ampliando sua participação na matriz energética dos países. Através desse estudo, notou-se que é possível obter resultados satisfatórios com boa viabilidade econômica, usando tanto o biogás como a energia fotovoltaica para produzir energia elétrica.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Construir modelos de geração híbrida em pequena escala para testar no local do estudo os resultados e compará-los aos simulados pelo software Homer Pro;
- Fazer uma análise econômica mais profunda, levando em consideração as taxas de juros e inflação para efeito de tempo de retorno do investimento;
- Simular o uso do biogás nas frotas de veículos que prestam serviço para a concessionária de Água e Esgoto.

6 ARTIGO CIENTÍFICO

No Apêndice A encontra-se o artigo científico “Políticas públicas do Brasil para expansão da energia solar fotovoltaica na geração distribuída: uma revisão da literatura no período 2011-2021” fruto do desenvolvimento de parte do estudo deste trabalho que foi submetido à Revista Interscienceplace, Qualis A4 da área do PROFNIT, em coautoria do discente e do orientador, sendo um apêndice do relatório técnico do TCC, na data de 07/10/2022.

The image shows two screenshots. The top one is from the InterSciencePlace website, displaying a submission queue. The bottom one is from the Sucupira system, showing the classification criteria for a journal.

InterSciencePlace Submissions

My Queue (1) Archives Help

My Assigned Search Filters New Submission

204 GOMES PINHEIRO et al.
BRAZIL'S PUBLIC POLICIES FOR THE EXPANSION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY IN DIST... Submission View

Sucupira Classification System

* Evento de Classificação: CLASSIFICAÇÕES DE PERIÓDICOS QUADRIÊNIO 2017-2020

Área de Avaliação: ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA E DE EMPRESAS, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E TURISMO

ISSN: 1679-9844

Título:

Classificação: -- SELECIONE --

Consultar Cancelar

Periódicos

ISSN	Título	Área de Avaliação	Classificação
1679-9844	INTERSCIENCE PLACE	ADMINISTRAÇÃO PÚBLICA E DE EMPRESAS, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E TURISMO	A3

Início Anterior 1 Próxima Fim

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Ministério de Minas e Energia. **ANEEL**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>. Acesso em: 12 dez. 2022.

ÁGUAS DO PARAÍBA (2021). Disponível em: <https://www.grupoaguasdobrasil.com.br/aguas-paraiba/>. Acesso em: 12 dez. 2021.

ALVES, J. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. Dissertação (Mestrado em Energia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANDRADE NETO, C. O. **Sistemas Simples para Tratamento de Esgotos Sanitários – Experiência Brasileira**. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em Questão**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 11-32, jun. 2006.

BÄR, K. *et al.* Potencial de Flexibilidade de Sistemas Híbridos de Usina Fotovoltaica e Usina de Biogás na Rede de Distribuição. **Chemical Engineering Technology**, v. 43, n. 8, p. 1571-1577, 2020.

BERNARDES, E. R. **Viabilidade econômica da geração distribuída com biogás: aplicada ao meio rural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

BERNARDES, R. L. M.; GIAROLA, E. Indicadores de viabilidade na implementação de um sistema híbrido de energia. **MBA em Finanças e Estratégias Empresariais**, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 1-8, 2019.

BHATT, A.; SHARMA, M. P.; SAINI, R. P. Feasibility and sensitivity analysis of an off-grid micro hydro–photovoltaic–biomass and biogas–diesel–battery hybrid energy system for a remote area in Uttarakhand state, India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 61, p. 53-69, aug. 2016.

BITTON, G. **Wastewater Microbiology**. 3rd ed. [S.l.]: Wiley, 2005.

BRASIL. **Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2004. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.htm. Acesso em: 20 jun. 2022.

BRASIL. **Resolução normativa n.º 390**. Brasília: Presidência da República, 2009. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=110&data=18/12/2009>. Acesso em: 20 jun. 2022.

CERVI, R. G. **Avaliação econômica do aproveitamento do biogás e biofertilizante produzido por biodigestão anaeróbia**: estudo de caso em unidade biointegrada. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) — Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2009.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: Reatores Anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

COELHO, S. T.; VELAZQUEZ, S. M. S. G. S. O. C. V. A. J. P. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. **Agrener**, [S.l.], v. 4, n. 6, p. 1-10, 2006.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2006.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR (CAPES). Ministério da Educação. Sobre. Quem somos. **CAPES**, 2022. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/sobre/quem-somos.html>. Acesso em: 10 mar. 2022.

CONSTANT, M. *et al.* **Biogas end-use in the European Community**. Barking, Uk: Elsevier Science Publishers, 1989.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CRESWELL, J. W. **Projeto de pesquisa**: métodos qualitativo, quantitativo e misto. Tradução de Magda Lopes. Consultoria, supervisão e revisão técnica Dirceu da Silva. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

DEFANTI, M. da S. C. **Análise bibliométrica e mapeamento sobre o tema arritmia e drogas anticoagulantes**. Dissertação (Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional) – Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, 2019.

DINIZ, E. M.; BERMAN, C. Economia verde e sustentabilidade. **Estudos Avançados**, [S.l.], v. 26, n. 74, p. 323-329, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2021 - Relatório Síntese 2021. **EPE**, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 10 out. 2021.

ETCHECOIN, C. Protocolo de Kyoto: Passaporte das Futuras Gerações. **CENBIO Notícias**, [S.l.], v. 3, n. 8, p. 4-18, 2000.

FERREIRA, J. C. B.; SILVA, J. N., Biodigestor: aplicações e potencialidades. Um estudo de caso do IFMG campus Bambuí. *In: SEMANA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA*, 2., 2009, Bambuí. **Anais [...]** IFMG: Bambuí, 2009.

FGV DATASAN. Comparativos de desempenho. **FGV**, 2022. Disponível em: <https://datasan-ibre.fgv.br/dashboard>. Acesso em: 10 maio 2022.

FRARE, L. M. **Estudos para a implementação de uma planta para remoção de ácido sulfídrico de processos de produção de biogás**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual de Saneamento**. Brasília: Ministério da Saúde, 2004. Disponível em: https://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_saneamento_3ed_rev_p1.pdf. Acesso em: 10 maio 2022.

FUNDO CLIMA (BNDES). **Ferramenta de Cálculo de Redução de Gases do Efeito Estufa – GEE's**. 2016. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima/ferramenta-calculo-reducao>. Acesso em: 15 maio 2022.

GIL, A. C. **Como elaborar um projeto de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GODOI, R. B. **Projeto de um sistema híbrido fotovoltaico com microgeração hidráulica para consumidor isolado**. Monografia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE (ICLEI). **Manual para aproveitamento do biogás**: volume um, aterros sanitários. São Paulo: Secretariado para América Latina e Caribe, 2009. Disponível em: <https://e-lib.iclei.org/manual-para-aproveitamento-de-biogas-volume-i-aterros-sanitarios/>. Acesso em: 10 maio 2022.

HOBSBAWM, E. J. **A era das revoluções: 1789-1848**. São Paulo: Paz & Terra, 2014.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA). **IEA.Agricultura**, 2022. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/index.php>. Acesso em: 10 maio 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **INPE**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br>. Acesso em: 10 maio 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PROPRIEDADE INTELECTUAL (INPI). INPI – Espacenet. **Espacenet**, 2022. Disponível em: <https://pt.espacenet.com/>. Acesso em: 10 out. 2021.

JUMARE, I. A.; BHANDARI, R.; ZERGA, A. Assessment of a decentralized gridconnected photovoltaic (PV) / wind / biogas hybrid power system in northern Nigeria. **Sustainability and Society**, [S.l.], v. 10, n. 30, p. 1-25, 2020.

Disponível em:

<https://energysustainsoc.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s13705-020-00260-7.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

LEONI, P. **Projeto híbrido eólico solar: uma alternativa para aumentar a competitividade e facilitar a penetração de projetos fotovoltaicos de maior porte no país**. Brasil: [s.n.], 2016.

LIJUAN, D. *et al.* **Fotovoltaica e planta de tratamento de esgoto sistema combinado de energia e calor de biogás**. Depositante: MONGOLIA INTERIOR HENGRUI NOVA ENERGIA CO LTD. CN212610187U. Depósito: 18 jun. 2020. Concessão: 26 fev. 2021. Disponível em:

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/074755613/publication/CN212610187U?q=CN212610187U>. Acesso em: 10 set. 2022.

LINDEMEYER, E. M. **Análise da Viabilidade Econômico-Financeira do Uso do Biogás como Fonte de Energia Elétrica**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MACHADO, R. C. P. **Ferramenta computacional para geração distribuída a partir de sistemas híbridos renováveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

MACHADO JUNIOR, C. *et al.* As Leis da Bibliometria em Diferentes Bases de Dados Científicos. **Revista de Ciências da Administração**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 111-123, 25 abr. 2016.

MAHMUD, N.; HASSAN, A.; RAHMAN, M. S. Modelagem e análise de custos do sistema de energia híbrida para St. Martin Island usando o HOMER. **IEEE**, [S.l.], v. 4, n. 6, p.10-60, 2013. Disponível em:

<ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazilsolaratlasR1.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

MARINI, J. A.; ROSSI, L. A. Projeto de sistemas fotovoltaicos para oferta de energia elétrica a comunidades rurais. **Institute of Electrical and Electronics Engineers**, [S.l.], v. 30, n. 6, p. 1-11, 2015.

MCCAIN, K. W. Mapping authors in intellectual space: A technical overview. **Journal Of The American Society For Information Science**, [S.l.], v. 41, n. 6, p. 433-443, set. 1990.

MINGLI, L. *et al.* **Photovoltaic é um dispositivo de energia de biogás em coordenação**. Depositante: DUYUN POWER SUPPLY BUREAU DE GUIZHOU POWER GRID CO LTD. CN204900061U. Depósito: 2 set. 2015. Concessão: 23 dez. 2015. Disponível em: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/054922245/publication/CN204900061U?q=CN204900061U>. Acesso em: 10 set. 2022.

NOGUEIRA, C. E. C. **Dimensionamento de Sistemas Integrados de Energia em Ambientes Rurais**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NUVOLARI, A. **Esgoto Sanitário – Coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2003.

OLIVEIRA, P. A. V. de; HIGARASHI, M. M. **Geração e utilização de biogás em unidades de Produção de suínos**. Concórdia: Embrapa, 2006.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Nações Unidas Brasil**, 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em: 20 nov. 2022.

PASADEOS, Y.; PHELPS, J.; KIM, B. Disciplinary Impact of Advertising Scholars: Temporal Comparisons of Influential Authors, Works and Research Networks. **Journal Of Advertising**, North Castle, v. 27, n. 4, p. 53-70, dez. 1998.

PEREIRA, R. S. **Poluição hídrica: causas e conseqüências**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas UFRGS, 2004.

RODRIGUES, I.; BARBIERI, J. C. A emergência da tecnologia social: revisitando o movimento da tecnologia apropriada como estratégia de desenvolvimento sustentável. **Revista de Administração Pública**, [S.l.], v. 42, n. 6, p. 1069-1094, 2008.

ROHSTOFFE, F. N. Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização. **Gulzow**, 2010. Disponível em: <https://goo.gl/bGtOqR>. Acesso em: 9 mar. 2022.

SILVA, B. J. B. **A Primeira Conferência Sobre Usos Pacíficos da Energia Atômica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência Tecnologia e Educação) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SOLARBUZZ. Energia Solar. **SOLARBUZZ**, 2008. Disponível em: <https://www.solarbuzzenergia.com.br/>. Acesso em: 9 mar. 2022.

SOUZA FILHO, A. J. T. S. **Análise da viabilidade de sistema híbrido biogás-solar na geração de energia e seus impactos nas emissões de gases**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) –

Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 2019.

SPINAK, E. Indicadores cienciométricos. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 27, n. 2, p. 141-148, 1998.

SUZUKI, H. Orbit Intelligence: Visão Geral Sobre o Sistema. **Axonal Consultoria Tecnológica**, 2016. Disponível em:

https://axonal.com.br/arquivos/PDF/Orbit_Visao_Geral_Sistema_PARTES_1_a_3_BUSCA_VISUALIZACAO_SELECAO.pdf. Acesso em: 11 out. 2022.

TRATA BRASIL. Ranking do saneamento 2022. **Trata Brasil**, 2022. Disponível em:

https://tratabrasil.org.br/images/estudos/Ranking_do_Saneamento_2022/Tabela_das_100_Cidades.pdf. Acesso em: 20 jun. 2022.

ÜSDIKEN, B.; PASADEOS, Y. Organizational Analysis in North America and Europe: A Comparison of Co-citation Networks. **Organization Studies**, Thousand Oaks, v. 16, n. 3, p. 503-526, maio 1995.

VAN HAANDEL, A. C.; LETTINGA, G. **Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente**. Campina Grande: Epgraf, 1994.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: UFMG, 1996.

WORLDOMETER. Atualizações do Coronavírus. **WorldO'meter**, 2022.

Disponível em: <https://www.worldometers.info/>. Acesso em: 10 set. 2022.

WOTTRICH, B. **Modelo para a análise econômica e financeira em projetos para geração distribuída de energia com fontes alternativas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

XIN, Y.; JING, X. **Dispositivo complementar de geração de energia fotovoltaica a biogás**. Depositante: XIAN XU JING RECURSOS

RENOVÁVEIS CO LTD. CN210041418U. Depósito: 7 fev. 2020. Concessão: 15 jun. 2021. Disponível em:

<https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/069351155/publication/CN210041418U?q=CN210041418U>. Acesso em: 10 set. 2022.

ZACHOW, C. R. **Biogás**. 2000. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2000.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. 2009. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica.** 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

ZUPIC, I.; CATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, Thousand Oaks, v. 18, n. 3, p. 429-472, dez. 2014.

ANEXO I – CARTA/OFÍCIO DE APOIO/INTERESSE**CARTA/OFÍCIO DE APOIO / INTERESSE**

Eu, Silas de Souza Almeida, Gerente Operacional, declaro o nosso apoio à proposta de Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso do Mestrado Profissional em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação – PROFNIT com o título GERAÇÃO HÍBRIDA DE ENERGIA RENOVÁVEL: SISTEMA BIOGÁS E FOTOVOLTAICO EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS a ser desenvolvido pelo mestrando Sandro Gomes Pinheiro, matriculado no Ponto Focal Instituto Federal Fluminense – IFF sob a orientação do Prof. Dr. Rogério Atem de Carvalho.

Campos dos Goytacazes, 27 de maio de 2022

A handwritten signature in blue ink is positioned above a horizontal line. The signature is stylized and appears to read "Silas de Souza Almeida".

Silas de Souza Almeida
Gerente Operacional
Águas do Paraíba
CPNJ: 01.280.003/0001-99

APÊNDICE A – ARTIGO CIENTÍFICO

POLÍTICAS PÚBLICAS DO BRASIL PARA EXPANSÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: UMA REVISÃO DA LITERATURA NO PERÍODO 2011-2021

RESUMO

No Brasil, nos últimos 10 anos, ocorreu significativo crescimento na geração de energia renovável. O progresso tecnológico trouxe ganhos de escala no que se refere às reduções no custo dessa energia. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo geral apresentar uma revisão de literatura sobre as políticas públicas brasileiras de incentivo e subsídio à geração distribuída no período 2011-2021. Como resultado, foi identificada significativa morosidade na difusão das políticas de incentivo à adoção da tecnologia fotovoltaica. A maior parte das ações governamentais se referem a isenções de alíquotas dos impostos sobre equipamentos importados, que contribuem positivamente para baixar os custos para as instalações solares comerciais e residenciais. Entretanto, são inexistentes as ações relativas a isenções tributárias para a cadeia produtiva nacional.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica. geração distribuída. políticas públicas.

THE ISSUE OF BRAZIL'S PUBLIC POLICIES FOR THE EXPANSION OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY FOR DISTRIBUTED GENERATION

ABSTRACT

In Brazil, in the last 10 years, there has been significant growth in the generation of renewable energy. Technological progress has brought gains of scale with regard to reductions in the cost of this energy. In this context, the general objective of this article is to present a literature review of Brazilian public policies to encourage and subsidize distributed generation in the period 2011-2021. As a result, a significant delay in the diffusion of policies to encourage the adoption of photovoltaic technology was identified. It was concluded that most governmental actions refer to tax rate exemptions on imported equipment, which positively contribute to lower costs for commercial and residential solar installations, however, actions regarding tax exemptions for the national production chain are non-existent.

Keywords: solar photovoltaic energy. distributed generation. public policies.

1 INTRODUÇÃO

Com o expressivo aumento no consumo de energia pela população mundial, a pesquisa por fontes renováveis é um assunto atual e indispensável. Dentre as mais relevantes fontes renováveis existentes, a energia solar fotovoltaica destaca-se, pois não polui o meio ambiente, é praticamente inesgotável, silenciosa, não consome combustível e pode gerar energia elétrica. No Brasil, o cenário é favorável para o uso da energia solar fotovoltaica e, por isso, desperta o interesse de empresas e população em geral. A partir de 2011, registrou-se uma grande demanda por esse tipo de fornecimento, fruto da redução dos custos de produção dos equipamentos que compõem todo o sistema fotovoltaico, normalização técnica de instalações, políticas públicas de incentivos fiscais, linhas especiais de financiamento para aquisição dos equipamentos, além das características climáticas do país (PINHO; GALDINO, 2014).

Em função de seu extenso território e da elevada irradiação solar, o Brasil pode aumentar consideravelmente a participação da fonte solar fotovoltaica em sua matriz energética. Segundo levantamento da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020), estima-se que o equivalente ao consumo de todo o Brasil, em 2011, poderia ser gerado com 2.400 Km² de painéis fotovoltaicos, o que corresponde a menos de 0,03% do território nacional. Apenas no segmento residencial, se fosse possível instalar sistemas solares nos telhados de todas as residências do Brasil, seria possível gerar o equivalente a 165 GW. O Brasil tem potencial para gerar milhares de GWh de energia solar, muito mais do que a soma de todas as demais fontes juntas.

O Brasil possui legislações que favorecem o avanço da energia solar fotovoltaica, embora não sejam suficientes para contemplar grande parte da nossa capacidade. Recentemente, tramitou no Senado Federal o Projeto de Lei n.º 5.829 (BRASIL, 2019). O documento aprova o marco regulatório da geração distribuída de energia, entretanto, para que essa tecnologia se torne mais competitiva, é necessário desenvolver mais políticas públicas para o desenvolvimento de pesquisa, inovação e desenvolvimento tecnológico, acesso facilitado a créditos e isenções, redução de custos, burocracias e encargos.

Diante desse cenário, o objetivo deste artigo é apresentar uma revisão de literatura sobre as políticas públicas brasileiras de incentivo e subsídio à geração distribuída no período 2011-2021. A matriz elétrica brasileira é de predominância hidrelétrica (fonte renovável), entretanto, a operação desses sistemas é afetada constantemente pelas secas que reduzem drasticamente a água dos seus reservatórios, impedindo sua operação plena. Tal realidade pode ameaçar a condição do Brasil de país líder na geração de energia renovável em função da necessidade de acionamento de usinas termoelétricas que utilizam fontes não renováveis.

Para elaboração desta pesquisa foram utilizados artigos científicos disponíveis nas bases de dados do portal de periódicos da CAPES, acesso CAFe, no período compreendido entre 2011 e 2021. As palavras-chaves utilizadas com o operador booleano “AND” foram: “Fotovoltaico AND Políticas Públicas” e “Photovoltaics AND Public Policy”. A fim de complementar a pesquisa bibliográfica, foram pesquisados documentos oficiais e dados institucionais

obtidos por meio dos portais governamentais, tais como o da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Ministério do Meio Ambiente (MMA) e leis federais.

2 ENERGIA SOLAR: ASPECTOS INTRODUTÓRIOS

A energia obtida por intermédio do efeito fotoelétrico consiste na conversão da luz solar em energia elétrica. Em 2006, surgiram tecnologias mais eficientes baseadas em células de silício mono ou policristalino (material semicondutor), porém existem outros materiais sendo empregados, com aplicações diferentes para painéis, telhas e filmes finos. A corrente gerada nos painéis é corrente contínua (CC) que, ao passar pelo inversor de frequência, transforma-se em corrente alternada (CA) para ser armazenada em baterias nos sistemas *off-grid* (desconectado da rede da concessionária local) ou injetada na rede da concessionária local *on-grid* (conectado à rede da concessionária local) e usada posteriormente para consumo residencial, comercial e industrial (MOCELIN, 2014).

A geração distribuída (GD) é o termo que se refere à energia elétrica gerada no local ou próxima da unidade de consumo. O Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE, 2014) define que a GD é a geração elétrica feita junto ou próxima do consumidor (ou conjunto de consumidores), independente da potência, tecnologia e fonte de energia. Em função da elevada demanda por energia elétrica, elevação dos preços da energia e redução do custo dos equipamentos de geração, anualmente muitos consumidores se tornam geradores de energia e são os chamados “prosumidores”², aderindo à GD desde o setor comercial (maior consumidor) até a iluminação pública (menor consumidor) (LUNA *et al.*, 2018).

No Brasil, os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como *off-grid* ou *on-grid*, que permitem o *net metering*³. Em relação à potência, os sistemas são divididos em dois: microgeração até 75kWp e minigerção acima de 75kWp e até 5MW (ANEEL, 2015). Quanto às modalidades, são quatro: GD junto à carga; condomínio com geração distribuída (GD) na área comum; autoconsumo remoto (mesma titularidade/mesma área de concessão); geração compartilhada consórcio/cooperativa (diferentes titularidades/mesma área de concessão) (ANEEL, 2019).

Nesse sentido, a utilização de fontes solares para geração direta de energia proporciona vários benefícios ambientais e socioeconômicos e é citada pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2016) como principal contribuinte para diversificação de uma matriz energética mais limpa, redução de perda e alívio de transformadores e alimentadores. Dentro do cenário ambiental, pode-se levar em consideração a redução das emissões dos gases do efeito estufa, redução de emissões de materiais particulados e do uso de água para geração de energia elétrica. A geração de energia solar fotovoltaica

² Neologismo formado pela junção das palavras produtor e consumidor.

³ Sistema de compensação de energia elétrica no qual a carga produzida é creditada na concessionária local para abater o consumo da unidade posteriormente.

contribui para a geração de empregos locais e, conseqüentemente, para o aumento de investimentos na tecnologia.

O MME (BRASIL, 2017) afirma que, ao final de 2016, o Brasil possuía 81 MWp de energia solar fotovoltaica instalados, o que equivale a 0,05% da capacidade total do país. O Brasil apresenta elevados níveis de insolação e elevadas reservas de quartzo, que podem gerar vantagens competitivas para produção de células e módulos solares, produtos com elevado valor agregado (EPE, 2012).

3 DESENVOLVIMENTO DE INOVAÇÕES E ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS

Quando há a ocorrência de um processo de desenvolvimento de uma inovação, faz-se necessário compreender que seu processo de adoção é a ocasião em que uma pessoa passa do conhecimento preliminar de uma nova tecnologia a uma decisão de adoção ou rejeição da implementação de uma nova ideia (ROGERS, 2003). Esse processo de aderir de fato, ou desconsiderar a inovação, delimita-se em conhecimento, persuasão, decisão, implementação e confirmação.

Rogers (2003), nesse cenário, classificou os adotantes das inovações em quatro dimensões sociológicas: a) inovadores - gostam de riscos, são indivíduos dotados de educação formal, frequentemente são os *outsiders* bastante relacionados com a comunidade local; b) primeiros adotantes - líderes locais e indivíduos de alto prestígio em comunidade, mas não fora dela (são costumeiramente os líderes de opinião mais eficientes, sendo assim, caso os indivíduos nessa categoria social adotem inovações, o restante segue, caso contrário, a inovação tende a não se dispersar); c) maioria precoce - determinada, mais tradicional, possui menos instrução ou menos predisposição a ser um líder do que a da adotante precoce, porém com perspectiva de seguir líderes de opinião; e d) maioria tardia e retardatários - ainda mais ligados à tradição, são, constantemente, pessoas com menor poder aquisitivo e com status mais baixo, em que se precisa da pressão dos pares para encorajar a adoção.

No contexto do Brasil, diversamente dos países desenvolvidos, é imprescindível salientar que o retorno do investimento e a capacidade financeira para adquirir um sistema fotovoltaico representam tomadores de decisão para que a adoção dessa tecnologia seja feita pelos consumidores (DOS SANTOS; CANHA; BERNARDON, 2017).

Nascimento *et al.* (2020) indicaram a previsão da adesão da tecnologia de sistemas fotovoltaicos em função de 12 indicadores, dentre os quais apresentaram maior destaque: o aumento de tarifas do setor, redução do custo do sistema fotovoltaico, eficiência do sistema fotovoltaico, produção estimada relativa à incidência solar, financiamento bancário disponível e políticas públicas, como isenções de impostos e campanha de conscientização.

França Jr (2020), por meio de levantamento bibliográfico, identificou o que determinava a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede, selecionando artigos carregados em países europeus. Foi identificado pelo autor

um total de 45 variáveis para a adoção da tecnologia e, dentre elas, foram classificadas: comportamento ou atitude ambiental; tamanho da residência; tipo de ocupação da residência; tipo da residência; densidade populacional; densidade habitacional; nível educacional; renda e incentivos financeiros. Destaque para as três últimas variáveis em função do maior impacto na adoção.

França Jr (2020) utiliza as bases de dados do governo, como a ANEEL, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), dentre outros, para conduzir seus estudos, além de um modelo longitudinal para indicar quais determinantes são importantes para adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede. As teses de pesquisa apresentadas e comprovadas pelo autor no cenário nacional são: i) a existência de fontes de financiamento federal exerce influência positiva sobre a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais?; ii) adesão dos Estados ao convênio do ICMS 16/2015 impacta positivamente para a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais?; iii) a densidade habitacional de cada Estado exerce influência positiva sobre a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais?; iv) o consumo médio residencial de eletricidade do Estado (kWh/mês) impacta positivamente a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais?; e v) a tarifa média de eletricidade de cada Estado exerce influência positiva sobre a adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais?

Os estudos referenciados ratificam a relevância dos governos no processo de adoção dessa tecnologia. Malerba (2003) menciona a possibilidade de eles a adotarem e apoiarem o uso em organizações públicas.

4 POLÍTICAS PÚBLICAS BRASILEIRAS EM RELAÇÃO ÀS FONTES RENOVÁVEIS

Por conceito, políticas públicas representam uma reunião de programas, ações e atividades elaboradas pelo Estado, direta e indiretamente, em conjunto com entes públicos ou privados, objetivando garantir certo direito de cidadania para determinado segmento social, cultural, ético ou econômico, ou de maneira difusa. Dentro do cenário capitalista brasileiro, as políticas públicas possuem o propósito de mitigar a pobreza e as desigualdades sociais, assegurar o acesso à cidadania com aspirações ao aumento da democratização e da sociabilidade das pessoas (BELINOVSKI, 2013).

Nesse sentido, as políticas públicas podem ser essenciais para a expansão do ramo de energia renovável. Aquila *et al.* (2017) pormenorizam que os governos podem impulsionar o mercado de energia renovável adotando estratégias variadas, dentre as quais, pode-se exemplificar as políticas públicas de curto e longo prazo, em que as primeiras finalizam quando as estratégias são concluídas e as segundas, por sua vez, finalizam quando as políticas foram implementadas, originando, então, o mercado de energia renovável.

Um enfoque interessante para o estímulo à adoção da tecnologia fotovoltaica é a estratégia de incentivos fiscais nos equipamentos, instalações e montagem, podendo ser concedidos tanto pelo Governo Federal, para os casos com incidência de Imposto de Importação (II), Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), Programa de Integração Social (PIS) e Contribuição para

o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), quanto pelo governo estadual, para os casos com incidência do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS). As alíquotas dos impostos podem flutuar dependendo do produto em pauta, conforme pode ser observado na Tabela 1. Em concordância com esses dados, estima-se que a carga tributária para uma instalação de geração distribuída fotovoltaica seja de aproximadamente 25% do valor de venda e montagem dos equipamentos, com especial destaque para os componentes inversor e estrutura, cabos e conexão, sobre os quais ocorre maior incidência (EPE, 2020).

Tabela 1 - Impostos sobre equipamentos e serviços associados

Componente	II	ICMS	IPI	PIS	COFINS	ISS	Total
Módulo	0%	0%	0%	1,65%	7,65%	0%	9,3%
Inversor	0%	12%	15%	1,65%	7,65%	0%	36,3%
Estruturas, cabos, conexão	0%	18%	10%	1,65%	7,65%	0%	37,3%
Projeto, registro, instalação	0%	0%	0%	1,65%	7,65%	5%	14,3%

Fonte: Adaptado de EPE (2020).

O Brasil adota o sistema de leilões como política pública de longo prazo, em que produtores de energia renovável são convidados a concorrer dentro de uma determinada capacidade de geração ou de um determinado orçamento, possibilitando aos produtores utilizarem diversas fontes de energia no mesmo leilão ao contratarem as ofertas mais baratas por kWh. Vale a pena ressaltar que, nos leilões da energia eólica, também ocorre a combinação de diferentes fontes de energia (MIR ARTIGUES; DEL RIO, 2014).

O sistema *Net Metering* (medição líquida) é uma maneira importante de estimular a produção de energia renovável em pequena escala. Tal sistema foi implementado no Brasil após a Resolução Normativa ANEEL n.º 482/2012 e consiste na compensação total ou parcial da energia consumida da concessionária pelo usuário da energia renovável, o qual é possibilitado pela utilização de um medidor bidirecional que mostra o consumo e a geração da energia. O equilíbrio entre o consumo e a geração acontece no fim de cada ciclo mensal ou bimestral (AQUILA *et al.*, 2017; DE FARIA; TRIGOSO; CAVALCANTI, 2017).

É possível mensurar o êxito da difusão da tecnologia fotovoltaica no mundo observando-se que países como a China, Japão, Alemanha e Estados Unidos foram responsáveis por 68% da capacidade global da geração de energia fotovoltaica em 2017, a partir do uso de políticas públicas de incentivos baseados em empréstimos para a instalação de sistemas conectados à rede, um sistema de preços que pagava tarifas superiores à da concessionária por toda a energia fornecida à rede (conhecidas como tarifas *feed in*), bem como incentivos de descontos, redução de impostos e subsídios, dependendo do país em que foi implantado (MELIN; CAMIOTO, 2019).

Ainda sobre as políticas públicas mundiais, o projeto *Solar America Initiative* (EUA) teve o propósito de tornar o setor de energia fotovoltaica mais competitiva até 2015, por meio de um mix de políticas públicas aliadas a diversas linhas de investimento, com crédito com juros mais baixos e isenções tributárias que alavancaram o segmento. Outro destaque foi a política de incentivo adotada pela Alemanha em 1991, por meio do Programa “Iniciativa 1.000 telhados solares”, que estabeleceu uma nova lei energética de maneira a permitir compensações aos geradores de energia por fontes renováveis (FRE). O programa alemão foi administrado pela instituição de Crédito Alemã para Reconstrução e garantiu o financiamento de 60% a 80% das instalações (ELGAMAL; DEMAJOROVIC; AUGUSTO, 2015). Foram instalados cerca de 2.200 sistemas conectados, totalizando aproximadamente 5,3 MWp em 1993 (IEA, 1999; JACOBSSON; LAUBER, 2004; STAISS; RAUBER, 2002). Entre 1998 e 2003 a energia fotovoltaica adquiriu maturidade na Alemanha e, em 1999, o Programa “100.000 Telhados” entrou em vigor, com aproximadamente 350 MW instalados. Em 2000, a Alemanha já havia se tornado líder mundial em telhados solares, sendo implementadas seis indústrias locais (em 1996 eram duas). Em 2007, aproximadamente 40.000 pessoas estavam trabalhando nesse setor, 842 MW de células foram produzidos apenas na Alemanha e cerca de 10.000 empresas estavam trabalhando no setor de energia fotovoltaica (EPIA, 2008).

As principais políticas públicas internacionais do setor são: investimento em P&D/Projeto luz do sol (Japão); Lei de energia alternativa e políticas de incentivo fiscal e financeiro (Japão); Políticas de investimento e *net metering* (EUA); Lei *Feed-in* (FIT): (Alemanha); Programa 1000 telhados (Alemanha); Novo projeto luz do sol (Japão); Programa 100.000 telhados (Alemanha); Ato de fontes renováveis de energia (Alemanha); *Feed-in tariff* (FIT): (Alemanha); Promoção da nova energia em nível regional (Japão); Programa de apoio para deter o aquecimento global (Japão); Decreto de incentivo na tarifa de energia FV (Itália); Programa conto de energia (incentivo na tarifa FV)/ mix de FIT e *net metering* (Itália); Programa *Golden Sun* (incentivo FIT; subsídio; P&D) (China); Lei de promoção das fontes renováveis (Japão); Mix de políticas *Solar America Initiative* (EUA) (ELGAMAL; DEMAJOROVIC; AUGUSTO, 2015). Ainda em âmbito internacional, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabelece para seus 193 estados-membros os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, sendo o número sete referente à energia limpa e acessível (ONU, 2015).

As políticas públicas advêm da demanda e são elaboradas para a resolução de problemas e para o fomento do desenvolvimento social e econômico. Assim, não existe um limiar bem delineado sobre as políticas públicas e a regulamentação (FUGIMOTO, 2005).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fonte solar vem recebendo diversos incentivos em virtude de o país dispor de abundantes alternativas de energias renováveis limpas. Em consonância com a nota técnica da EPE (2018), as elevadas taxas de irradiação solar em relação à média de outros países que são líderes na utilização dessa tecnologia, como Alemanha, apontam um potencial para inserção na matriz energética do Brasil, sendo composta por 61% híbrida, 8,6% eólica, 8,4%

biomassa e 1,5% fotovoltaica centralizada (ANEEL, 2020). Acredita-se que esses incentivos podem ser ampliados para que ocorra maior convergência na cadeia produtiva do setor, ressaltando que os benefícios existentes no Brasil são inferiores quando comparados a outros países com dificuldades de diversificação da matriz energética, que usam, em grande parte, fontes de geração de energia de natureza fóssil (EPE, 2014). No Quadro 1 foram listados exemplos de diversos instrumentos de apoio à cadeia solar brasileira.

Quadro 1 - Instrumentos de apoio à cadeia solar no Brasil

Ano	Nome	Resumo
1994	Decreto Presidencial em 27 de dezembro de 1994.	PRODEEM – permitiu a utilização de qualquer fonte alternativa de energia, porém houve destaque para a utilização de sistemas fotovoltaicos. Atendimento a comunidades isoladas.
1997	Convênio CONFAZ 101/97.	Incentivos de ICMS para módulos e células fotovoltaicas, desde que haja alíquota 0% de IPI ou isenção para esses produtos – válido para os produtos nacionais e importados.
2007	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (PADIS).	Trata-se de um conjunto de incentivos fiscais federais estabelecido com o objetivo de contribuir para a atração de investimentos nas áreas de semicondutores.
2007	Lei nº 11.488/2007 – Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura – REIDI.	Passível de ser usufruído pelos módulos e outros equipamentos destinados aos projetos de parques fotovoltaicos (geração centralizada). Refere-se à desoneração do PIS/COFINS para os produtos (módulos fotovoltaicos, inversores e outros, para os projetos de geração fotovoltaica).
2011	Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) Fotovoltaico /INMETRO – Portaria 4/2011.	Programa para aferir a qualidade, segurança e eficiência energética para produtos nacionais e importados.
2012	Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012.	Estabelece critérios para classificação de energia renovável, potência e regras para ligação ao sistema de distribuição de energia. Cria o sistema de Compensação de Energia Elétrica.
2014	Listas atualizadas pelo Decreto 8.247/2014 de células fotovoltaicas	São concedidas reduções a 0% nas alíquotas II, IPI, PIS e COFINS na aquisição local ou importada de máquinas, equipamentos.

2014	Realização de Leilões de Energia de Reserva (LERs).	Mais de 3 GW leiloados/contratados, que criaram demanda para o estabelecimento e desenvolvimento de uma cadeia produtiva do setor em território nacional. Em dezembro/2017, foi realizado um Leilão de Energia Nova.
2014	Lei de Informática Lei nº 13.023/2014 e ex-tarifário.	Estímulos tributários para viabilizar a produção local e o desenvolvimento local da cadeia produtiva – inversores, desoneração de máquinas/equipamentos.
2014	Plano de Nacionalização Progressiva para o setor	Criado pelo BNDES, em 2014, como forma de fomentar a indústria nacional, que promove financiamento mediante gradual agregação de valor à produção nacional – a metodologia FINAME para o setor foi flexibilizada em 2017.
2015	Resolução Normativa ANEEL n.º 687/2015.	Atualiza a 482/2012, com novos critérios para micro e mini geração distribuída, cria empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada e autoconsumo remoto.
2015	Convênio CONFAZ 16/2015.	Para a concessão pelos Estados de incentivos de ICMS para micro/mini geração – para consumidores residenciais, industriais, comerciais (inicialmente 24 Unidades da Federação aderiram a ele, e a partir de 2018 todos as 27 Unidades federativas aderiram ao convênio).
2015	Lei n.º 13.169/2015.	Isenção de PIS/COFINS para micro e mini geração.
2016	Liberação de recursos BNDES FINAME.	Linha de crédito voltada para a expansão da oferta de energias renováveis no país com foco em pessoas físicas e microempresas.
2019	Portarias MME n.º 389/2019	Contratação novos leilões com energia renovável.
2020	Resolução n.º 30, de 30/12/19 e Resolução n.º 55, de 22/06/20.	Altera para zero por cento as alíquotas do II incidentes sobre os Bens de Capital que menciona, na condição de ex-tarifários.
2020	Novo regulamento de credenciamento de módulos e Sistemas Geradores Fotovoltaicos no Credenciamento Finame (CFI).	Define como itens obrigatórios e relação mínima de componentes e/ou processos, de procedência nacional, que são exigidos para o credenciamento e manutenção no CFI do Sistema BNDES.

2021	Decreto 10.615 de 29.01.21 revoga o decreto de 2007 do sistema PADIS.	Define alíquota zero para impostos de PIS/PASEP, COFINS e IPI de produtos relacionados ao desenvolvimento da indústria, incluído os componentes fotovoltaicos.
2021	Lei n.º 5.829/2019	Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis n.º 10.848, de 15 de março de 2004, e n.º 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências.

Fonte: Adaptado de Lopes (2021).

Ao analisar o Quadro 1, nota-se que alguns elementos de apoio à cadeia de energia solar no território nacional tiveram início antes da resolução normativa n.º 482/2012, considerada um marco para a utilização dos sistemas fotovoltaicos no Brasil. Em 1994, o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM) conduzido pelo ministério das Minas e Energia (MME), teve por finalidade levar energia elétrica a comunidades rurais usando a geração fotovoltaica (GALDINO; LIMA, 2002). Atendia comunidades carentes isoladas, sem a cobertura da energia elétrica fornecida pela rede de distribuição convencional e utilizava fontes renováveis locais em base autossustentável, promovendo o desenvolvimento econômico e social (MME, 2002). Posteriormente, esse programa foi incorporado ao programa Luz para Todos, mas no período de vigência foram instalados 9 mil sistemas fotovoltaicos, a um custo de U\$ 70 milhões, sendo que 67% dessas instalações foram destinadas à eletrificação de postos de saúde e escolas (KRAUTER; KISSEL, 2004 apud LOPES, 2021).

A crise energética de 2001 levou o Brasil a dar mais ênfase a políticas energéticas, de maneira a utilizar o potencial energético o mais racionalmente possível. Em 2002, surgiu o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA (SALAMONI, 2009), entretanto, a produção de energia fotovoltaica não foi contemplada, em função da tecnologia, na época, ser aplicada apenas em sistemas de pequeno porte, em comunidades isoladas e não integrada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), este último exigido pelo programa (OEI, 2006). O PRODEEM, programa antecessor, proporcionou impacto na quantidade de instalação de sistemas fotovoltaicos, mas, por não exigir o mínimo de produção nacional, gerou a opção por licitações internacionais, consequentemente não contribuiu para o desenvolvimento da indústria nacional (VARELLA; CAVALIERO; SILVA, 2011).

A resolução normativa n.º 482 (ANEEL, 2012) é considerada um marco para o uso da tecnologia fotovoltaica no Brasil pois, a contar dela, o consumidor pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e ceder o sobressalente da produção para a rede de distribuição de sua localidade.

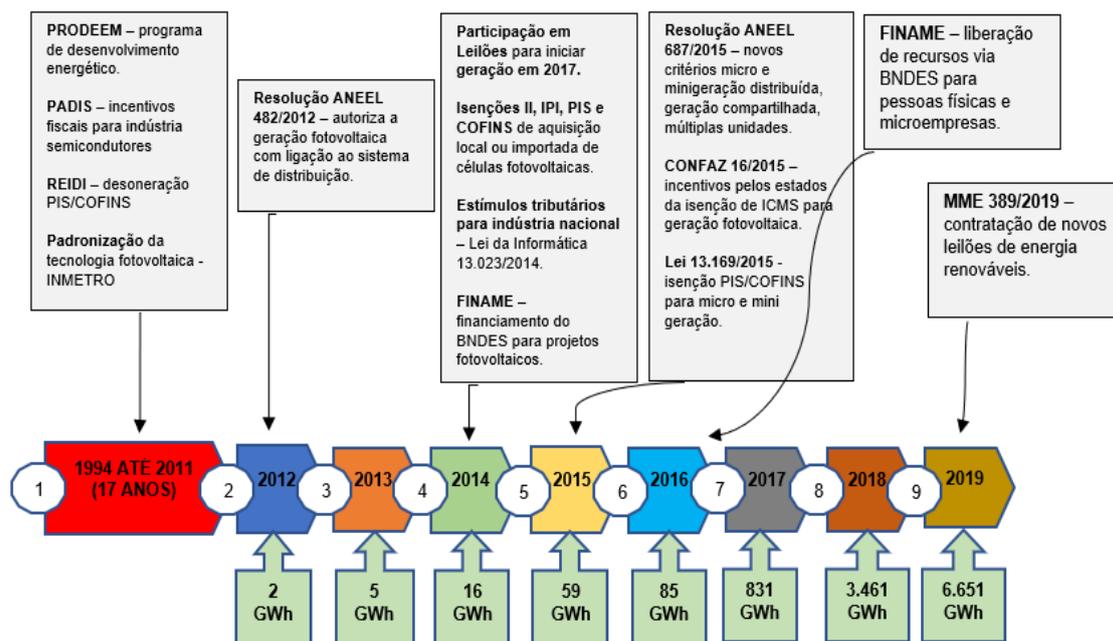
Em 2014, foram introduzidas normativas que retiraram impostos sobre diversos equipamentos e materiais utilizados na produção de energia fotovoltaica, também ocorreram investimentos no setor via Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (LOPES, 2021). A resolução n.º 687 (ANEEL, 2015) trouxe várias inovações, como a permissão da utilização de qualquer fonte renovável e a cogeração qualificada, denominando de microgeração e minigeração distribuída as centrais geradoras com capacidades até 75 KW ou entre 75 KW à 5 MW, respectivamente, conectadas em rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Outro benefício trazido pela resolução foi a utilização de créditos em meses posteriores, caso a produção de energia exceda o consumo, com prazo de 60 meses para tal.

A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2020) alertou que a desvalorização do real em função da pandemia do coronavírus elevou o preço de aquisição da maioria dos equipamentos utilizados nos sistemas fotovoltaicos, em função de serem, em sua maioria, importados da China. O governo interviu para conceder a isenção para alguns modelos de equipamentos usados em grandes usinas solares de geração centralizada.

Os incentivos nacionais destinados à geração de energia solar fotovoltaica envolvem: a pesquisa e desenvolvimento de projetos (P&D), o laboratório de Energia Fotovoltaica Richard Louis Anderson, o fundo solar, o programa “Luz para Todos”, os descontos nas tarifas de uso dos sistemas de distribuição (TUSD) e dos sistemas de transmissão (TUST), a venda direta a consumidores, o sistema de compensação Micro e Minigeração Distribuída (*net metering*), o convênio nº 101 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ), o regime especial de incentivos para o desenvolvimento da infraestrutura (REIDI), debêntures incentivadas, programa de apoio ao desenvolvimento tecnológico da indústria de semicondutores (PADIS), a lei da informática, redução do imposto de renda para aquisição de equipamentos, financiamentos pelo BNDES, apoio a projetos de eficiência energética (PROESCO), financiamentos pela Caixa Econômica Federal (CEF), o fundo do clima e o programa Inova Energia.

Na esfera empresarial, é possível destacar a Mobilização Empresarial pela Inovação (MEI), que tem como principal objetivo fomentar a estratégia inovadora das empresas do país e aumentar a efetividade das políticas de apoio à inovação, através da interlocução construtiva e permanente entre o setor público, a iniciativa privada e a academia (tripla hélice) (MEI, 2020).

Figura 1 - Política pública e geração fotovoltaica no Brasil



Fonte: Adaptado de EPE (2020, s.p).

Na Figura 1, é possível observar que o aumento mais significativo da geração elétrica solar no Brasil ocorreu a partir de 2017, por meio de diversas ações governamentais, como os leilões, isenções e abertura de crédito para financiamento de equipamentos para pessoas físicas e microempresas, entretanto, ao longo de 25 anos (1994 - 2019) é possível notar a ocorrência de poucas políticas públicas voltadas para essa tecnologia.

A partir da aprovação do marco legal da geração distribuída de energia em 2011, pretende-se dar mais incentivos ao uso de energias limpas e renováveis, mas é prevista uma compensação pelo uso das linhas de distribuição de energia elétrica. Isso ocorre pois, até hoje, não existe uma legislação para cobrir os custos pelo uso dos sistemas das concessionárias, que armazenam e distribuem o excesso de energia gerada. O texto do projeto lei cria um período de transição para a cobrança de encargos e tarifas sobre esse sistema e traz disposições sobre o direito adquirido, ou seja, o direito do “prossumidor” (produtor e consumidor) que já tenha iniciado sua geração individual anteriormente à publicação do documento. Assim, os micro e minigeradores não pagarão a tarifa por distribuição até 2045 (RIBEIRO, 2021).

Pelo texto votado na Câmara dos Deputados (BRASIL, 2019), os consumidores que solicitarem a entrada no sistema de geração distribuída até doze meses após a publicação da nova legislação também ficarão isentos até 2045. Para os novos consumidores, haverá uma regra de transição de seis anos. A proposta é que eles comecem a pagar por 15% dos custos associados à energia elétrica em 2023 – o percentual vai subindo gradativamente. Por fim, somente a partir de 2029, após o período de transição, os prossumidores de energia distribuída ficarão sujeitos às regras tarifárias estabelecidas pela Aneel.

O texto garante ainda o pagamento, pelos produtores e usuários do sistema de geração distribuída, da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

(Tusd) do “fio B” – o cabo entre a distribuidora e as unidades consumidoras. Esse pagamento é feito às distribuidoras e concessionárias que, pelas regras atuais, não são remuneradas pelo “uso do fio”.

Nos últimos 10 anos, o maior embate acerca do “uso do fio” se dá pela possibilidade de cobrança pelo uso da rede de distribuição, pelo fato de os consumidores do sistema de geração distribuída – ou seja, que produzem a própria energia – não pagarem pelo uso da rede elétrica nem por todos os encargos cobrados de consumidores do mercado regulado, à exceção da taxa de iluminação pública. Dessa maneira, os demais consumidores de energia acabariam pagando a conta dos subsídios concedidos ao sistema de geração distribuída por meio da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição. É certo, porém, que há de se definir e delimitar o que se entende por uso da rede de distribuição pelo “prossumidor”, uma vez que sua geração e consumo se dão *in loco*, sem a necessidade de utilização da rede de distribuição, ocorrendo apenas temporariamente a utilização da rede para armazenamento e compensação da eletricidade gerada e não consumida, surgindo daí o fato que ensejaria o pagamento pelo uso da rede.

Trata-se do que se convencionou chamar de subsídio cruzado, ou seja, uma classe de consumidores paga preços mais elevados para subsidiar os custos de um grupo específico sobre determinado serviço. Dessa maneira, um consumidor subsidia o outro, podendo o subsídio cruzado ser implícito, quando ele decorre da própria estrutura tarifária - como é o caso, ou explícito, quando é decorrente da legislação. As vozes favoráveis ao texto argumentam que a geração distribuída incentiva a democratização da geração de energia elétrica a partir de fontes limpas e renováveis, diminuindo o uso de usinas termelétricas e de combustíveis fósseis, que emitem grande volume de poluentes - pontos que perpassam questões de extrema relevância em tempos de aquecimento global e crise hídrica nacional, se fazendo cada mais necessários. Por outro lado, as vozes contrárias ao projeto argumentam que o texto fará manutenção do subsídio cruzado até 2045, concedendo os subsídios para quem já tem projetos de geração própria de energia, repassando a conta aos mais pobres, que não têm condições de ter, por exemplo, uma placa fotovoltaica em casa para captar energia solar.

Embora o Projeto de Lei tenha sido bastante promissor no sentido regulatório, parece que a discussão sobre os instrumentos hábeis à manutenção e desenvolvimento do projeto da geração distribuída no país não alçou patamares mais amplos. Isso porque, é viável discutir pelos instrumentos tributários na manutenção do projeto da GD, que sejam aptos à intervenção e manutenção da ordem econômica e ambiental, desonerando o consumidor regulado do subsídio cruzado. Assim, é possível falar sobre “tributação extrafiscal” como importante instrumento de indução, do qual pode e deve o Estado se valer para, intervindo na ordem econômica, conciliar desenvolvimento econômico e preservação ambiental.

6 CONCLUSÃO

A participação da energia fotovoltaica na matriz energética ainda é diminuta quando comparada a outras fontes de geração de energia. Dentre as razões para essa situação estão o alto custo e a falta de conhecimento dessa tecnologia. Por isso, mudar a matriz energética tradicional para fontes renováveis (fotovoltaica, eólica e biomassa) significa um desafio para as nações nas próximas décadas.

Passados 27 anos do decreto que instaurou o PRODEEM, apenas 1,1% de geração de energia fotovoltaica faz parte da matriz energética brasileira. Os esforços pontuais e não continuados denunciam a inexistência de um plano nacional para adoção massificada da energia fotovoltaica. Possivelmente, a adoção da tecnologia fotovoltaica por organizações públicas seria um estímulo para a indústria nacional e toda a cadeia produtiva correlata.

Em um cenário de ausência de uma proposta governamental para impulsionar um ambiente propício para estimular a adoção da energia fotovoltaica, as isenções tarifárias e a regulamentação do setor não serão suficientes. Grande parte das ações governamentais brasileiras foram no sentido de promover isenções tarifárias para placas e módulos fotovoltaicos importados e que contribuem para baixar o custo das aquisições dos equipamentos para instalações comerciais e residenciais. Em contraponto, inexistente isenção para quem vai produzir esses itens em território brasileiro.

A implantação da tecnologia fotovoltaica no Brasil demandará grande empenho de cooperação entre os governos federal, estadual e municipal, em uma estratégia de incorporação da tecnologia. Seria interessante integrar exemplos de políticas públicas aplicadas em outros países e que alcançaram sucesso na difusão dessa tecnologia. Dentre elas estão ações de premiação por geração.

7 PERSPECTIVAS FUTURAS

As políticas públicas implantadas para o setor fotovoltaico contribuirão para que muitas frentes de trabalho sejam criadas. Entretanto, para que os objetivos propostos sejam alcançados, será preciso contar com uma maior participação dos órgãos de fomento, com linhas de financiamento mais longas e taxas de juros mais baixas para que alcancem uma maior camada de consumidores. Considerando que atualmente não foi identificada a mensuração dos resultados pelo próprio poder público, observa-se a necessidade de implantação de sistemática de acompanhamento e de resultados para que tanto o poder público quanto a sociedade consigam medir o impacto dessas políticas e, assim, possam tratar pontualmente das melhorias necessárias para promover sua expansão e continuidade de forma sustentada.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a realização de estudos que relacionem as estratégias e os impactos das políticas públicas para o setor fotovoltaico em âmbito estadual e municipal.

REFERÊNCIAS

- ABNEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Isonomia tributária para módulos fotovoltaicos nacionais**. Audiência pública no Senado. Brasília: Presidência da República: 2019. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividadelegislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/apresentacoes-emeventos/2018/28-11-2018-minas-e-energia-discute-crise-na-industria-de-energiasolar/Jorge%20Funaro%20-%20ABINEE.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. A energia solar, o coronavírus e a recuperação econômica. **Absolar**, 2020. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/a-energia-solar-ocoronavirus-e-a-recuperacao-economica.html>. Acesso em: 12 nov. 2021.
- ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Geração Distribuída Solar Fotovoltaica**. Encontro Nacional dos Agentes do Setor Elétrico – ENASE. Rio de Janeiro, 2016.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração Distribuída – regulamentação atual e processo de revisão**. Brasília, 7 fev. 2019.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Portaria n.º 6.179, de 10 de dezembro de 2019. Aprova o Plano de Gestão Anual – PGA da ANEEL para o exercício 2020. **ANEEL**, 2020. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/prt20196179.pdf>. Acesso em: 29 out. 2021.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatório ANEEL 2008**. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <https://www.ariae.org/sites/default/files/2017-04/Relatorio%20Aneel%202008.pdf>. Acesso em: 29 out. 2021.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa n.º 687, de 24 de novembro de 2015. **ANEEL**, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 29 out. 2021.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa n.º 482, de 17 de abril de 2012. **ANEEL**, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 29 out. 2021.
- AQUILA, G. *et al.* An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1090-1098, 2017.
- BELINOVSKI, A. C. **Política de Assistência Social: Avanços e Possibilidades no Centro de Referência Especializado de Assistência Social (CREAS) do Município de Telêmaco Borba/PR**. Monografia (Especialização em Gestão Pública Municipal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DE FARIA, H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 469-475, 2017.

FRANÇA JR, R. M. **Fatores Determinantes da Adoção da Tecnologia Solar Fotovoltaica Residencial no Brasil**. 2020. 252 f. Dissertação (Mestre em Administração) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

DOS SANTOS, L.; CANHA, L.; BERNARDON, D. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. **Renewable Energy**, v. 116, p. 384-401, 2018.

ELGAMAL, G.; DEMAJOROVIC, J.; AUGUSTO, E. E. F. Os desafios da implementação da energia fotovoltaica no Brasil: uma análise dos modelos nos principais mercados mundiais. *In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE*, 17., 2015. **Anais [...]** São Paulo: ENGEMA, 2015.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2020. Anuário Estatístico de Energia Elétrica, Panorama do Consumo (GWh). **EPE**, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico168/Anu%C3%A1rio_2020_sp.pdf. Acesso em: 20 out. 2021.

[EPIA - European Photovoltaic Industry Association: Solar Generation V – 2008. Solar electricity for over one billion people and two million jobs by 2020. Competitiveness. EPIA, 2008. Disponível em: http://www.epia.org/fileadmin/EPIA_docs/documents/EPIA_SG_V_ENGLISH_FULL_Sept2008.pdf](http://www.epia.org/fileadmin/EPIA_docs/documents/EPIA_SG_V_ENGLISH_FULL_Sept2008.pdf). Acesso em: 20 out. 2021.

FUGIMOTO, S. K. **A Universalização do Serviço de Energia Elétrica Acesso e Uso Contínuo**. 2005. 264 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GALDINO, M. A. E.; LIMA, J. H. G.; RIBEIRO, C. M.; SERRA, E. T. O contexto das energias renováveis no Brasil. **Revista da DIRENG – Diretoria de Engenharia da Aeronáutica**, 2000.

IEA - Instituto de Economia Agrícola. CO2 Emissions Statistics. **IEA**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>. Acesso em: 30 jan. 2019.

INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética. O que é Geração Distribuída. **INEE**, 2014. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 20 out. 2021.

JACOBSSON, S.; LAUBER, V. The politics and policy of energy system transformation: explaining the German diffusion of renewable energy

technology. **Energy Policy**, v. 34. p. 256-276, 2004.

LOPES, A. Z. C. **Difusão da energia fotovoltaica a partir das políticas públicas no setor de energia no Brasil**. 2021. 39 f. Dissertação (Mestrado em propriedade intelectual e transferência de Tecnologia para Inovação, do setor de ciências sociais aplicadas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

LUNA, M. A. R. *et al.* **Solar photovoltaic distributed generation in Brazil: the case of resolution 482,2012**. Applied Energy Symposium and Forum, Renewable Energy Integration with Mini/Microgrids, REM 2018, 29–30 September 2018, Rhodes, Greece. Energy Procedia, sep. 2018.

MALERBA, F. Sectoral Systems and Innovation and Technology Policy. Revista Brasileira de Inovação. **Bocconi University**, v. 2, n. 2, p. 329-375, jul. 2003.

MEI - Mobilização Empresarial pela Inovação, Indústria 2027. **Portal da Indústria**, 2020. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/cni/canais/industria-2027/>. Acesso em: 25 out. 2021.

MELIN, M. F. M.; CAMIOTO, F. D. C. A importância de incentivos governamentais para aumentar o uso da energia solar. **Revista GEPROS**, v. 14, n. 5, p. 89-108, 2019.

MIR ARTIGUES, P.; DEL RIO, P. **Combining Tariffs, Investment Subsidies and Soft Loans in a Renewable Electricity Deployment Policy**. Barcelona: Universidade de Barcelona, 2014.

MME - Ministério das Minas de Energia. **Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica**. Apresentação: Laura Porto: COPPE, 2002. MOCELIN, A. R. **Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos**. 2014. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MOURA, R. A. **Desempenho das diferentes tecnologias de silício na geração fotovoltaica no semiárido nordestino – estudo de caso: sistema de 10kwp do IFBA**. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal da Bahia, Paulo Afonso, 2017.

NASCIMENTO, F. M. *et al.* Factors for Measuring Photovoltaic Adoption from the Perspective of Operators. **Sustainability**, v. 12, p. 3184, 2020.

ONU - Organização das Nações Unidas. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/ods7/>. Acesso em: 13 nov. 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **CEPEL/CRESESB**, 2014.

RIBEIRO, B. D. O que a aprovação do Marco Regulatório da Geração

Distribuída de Energia traz de novo aos produtores, consumidores e contribuintes? **Migalhas**, 23 ago. 2021.

ROGERS, E. M. **Diffusion of Innovations**. 5. ed. New York: Free Press, 2003.

SALAMONI, I. T. **Um programa residencial de telhados solares para o Brasil**: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

STAIß, F.; RÄUBER, A. Estratégias em Pesquisa e Desenvolvimento Fotovoltaico — Programas de Introdução ao Mercado. *In*: BUBENZER, A.; LUTHER, J. (eds.). **Guia fotovoltaico para tomadores de decisão**. Berlim: Heidelberg, 2003.

VARELLA, F. K. O. M.; CAVALIERO, C. K. N.; SILVA, E. P. Sistemas Fotovoltaicos no Brasil: Estimativa do Índice de Nacionalização. **Revista Brasileira de Energia**, v. 17, n. 2, p. 193-216, 2011.