

Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP
Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída
E Eficiência Energética

Rodrigo Garcia Mezzarano

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS
A Partir de Resíduos de Unidades de Varejo Alimentar

SÃO PAULO– SP

2020

Rodrigo Garcia Mezzarano

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Utilizando Resíduos de Unidades de Varejo Alimentar

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP, como requisito para o recebimento do diploma de especialista em energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética.

Orientadora: Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho

SÃO PAULO – SP

2020

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

Catálogo-na-publicação

Mezzarano, Rodrigo

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE PROJETO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS /
R. Mezzarano -- São Paulo, 2020.
68 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.biogás 2.energia renovável 3.geração distribuída 4.análise de viabilidade I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade técnica e econômico-financeira da implementação de uma usina que gera eletricidade através do biogás produzido com os resíduos orgânicos coletados de uma rede de supermercados na cidade de São Paulo. O estudo coletou dados de geração de resíduos para o ano de 2019 nas unidades de negócios da cidade que pertenciam à rede, com esses dados foi estimado o potencial de geração de biogás de acordo com as características dos rejeitos. Com essa estimativa foi possível calcular a energia elétrica que poderia ser gerada através da queima deste combustível em motor ciclo Otto. Os custos foram estimados de acordo com a literatura consultada, sendo assim possível elaborar um estudo de viabilidade financeira com algumas premissas definidas para o período de operação da planta. É importante ressaltar que a análise de viabilidade desse empreendimento não deve passar apenas pela ótica financeira, uma vez que os benefícios ambientais promovidos pela utilização de combustíveis renováveis são relevantes, principalmente na conjuntura atual. Além disso, deve-se levar em consideração a maximização na utilização de recursos que seriam desperdiçados em lixões, acentuando a poluição atmosférica e do solo. Os resultados obtidos não indicam a viabilidade financeira deste tipo de empreendimento, assim, são apresentadas sugestões de medidas políticas para sua viabilização.

PALAVRAS-CHAVE: Geração distribuída. Energia renovável. Biogás. Análise de viabilidade.

ABSTRACT

This study here presented had the objective of analyzing the technical and economic-financial feasibility of the implementation of a biogas-based thermoelectric power plant, using organic residues from market chain located in the city of São Paulo. The study collected data from residues production in 2019, assessed from the stores in the local chain, from that, the biogas production was estimated according to the residue's characteristics. Therefore, it was possible to evaluate the electric power potential for this plant, using an Otto engine adapted specifically for this type of fuel. The costs related to the construction of the plant were based on consulted literature review, allowing an economic analysis of the plant operation based on premises involving the plant life cycle. It is important to highlight that the feasibility analysis of this action should not be based only on an economic perspective, since the environmental benefits promoted by the utilization of renewable fuels are relevant, mainly in the current situation. Besides that, one must take in consideration the maximization in the use of resources that would be disposed in landfills, accentuating atmospheric and soil pollution. Therefore, considering the negative results for the economic-financial analysis, this study proposes new policies to collaborate to the implementation of such projects.

KEYWORDS: Distributed generation. Renewable energy. Biogas. Feasibility analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de digestão Anaeróbio.....	19
Figura 2 - Influência das diferentes temperaturas de operação na eficiência do processo ...	28
Figura 3 - Esquema representativo do CSTR.....	30
Figura 4 - Gráfico Número de Reynolds x Número de Potência.....	33
Figura 5 - Seleção do tipo de rotor para analisar curva equivalente.....	33
Figura 6 - Grupo motogerador a biogás.....	36
Figura 7 - Motor 4 tempos.....	37
Figura 8 - Ciclo Otto	38
Figura 9 - Vista expandida de um gerador	39
Figura 10 - Especificações do motogerador	41
Figura 11 - Gráfico de operação Imbil BHI 15 L	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Geração distribuída por estado brasileiro.....	13
Tabela 2 - Fonte de GD por estado brasileiro.....	14
Tabela 3 - Dados coletados de resíduos gerados.....	22
Tabela 4 - Caracterização dos resíduos.....	22
Tabela 5 - Avaliação da fração orgânica	23
Tabela 6 - Avaliação da água a ser adicionada no sistema	24
Tabela 7 - Resumo de carregamento do biodigestor	26
Tabela 8 - Estimativa de produção de biogás.....	27
Tabela 9 - Dimensões do biodigestor.....	30
Tabela 10 - Seleção do tipo de impulsor	32
Tabela 11 - Dados sobre o agitador de pás.....	34
Tabela 12 - Especificações do exaustor selecionado.....	35
Tabela 13 - Peso específico e PCI do biogás em função da concentração de metano.....	39
Tabela 14 - Considerações e cálculos da recuperação de calor	43
Tabela 15 - Dados de operação da bomba selecionada	46
Tabela 16 - Custos com equipamentos	47
Tabela 17 - Horas necessárias por atividade	48
Tabela 18 - Consumo elétrico área administrativa.....	49
Tabela 19 - Detalhamento dos equipamentos auxiliares	49
Tabela 20 - Comparação entre modalidades tarifárias	50
Tabela 21 – Consolidação dos custos de operação e manutenção.....	51
Tabela 22 - Composição do capital por cenário proposto	55
Tabela 23 - Estimativa tarifa Biogás.....	56
Tabela 24 - Resumo dos três cenários avaliados	57

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1.	Contextualização	9
1.2.	Objetivos Gerais	11
1.3.	Objetivos Específicos	11
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1.	Geração Distribuída	12
2.2.	Resíduos Sólidos	15
2.3.	Biogás	17
2.4.	Digestão anaeróbia	18
2.5.	Codigestão anaeróbia	20
3.	METODOLOGIA	21
3.1.	Estimativa de produção de biogás	26
3.2.	Seleção do biodigestor	27
3.3.	Seleção dos agitadores	31
3.3.1.	Agitador mecânico	31
3.3.2.	Recirculação	34
3.3.3.	Resultado	35
3.4.	Seleção e dimensionamento do gerador a biogás	36
3.5.	Recuperação de calor	42
3.6.	Dimensionamento dos equipamentos auxiliares	44
3.7.	Custos de Implementação e Operação	46
3.7.1.	Custos de implementação	46
3.7.2.	Custos de operação e manutenção	47
3.7.3.	Tarifa de energia elétrica	50
3.7.4.	Consolidação dos custos envolvidos no processo	50
4.	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	52
4.1.	Conceitos Financeiros	52
4.1.1.	Taxa Mínima de Atratividade	52
4.1.2.	Custo de Capital Total	52
4.1.3.	Valor Presente Líquido	52
4.1.4.	Payback	53
4.1.5.	Taxa Interna de Retorno	53
4.2.	Premissas	53

4.3. Resultados	56
5. CONCLUSÕES.....	58
BIBLIOGRAFIA	62
APÊNDICE A – PREMISSAS FINANCEIRAS.....	66
APÊNDICE B – TABELA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA CENÁRIO PESSIMISTA.....	67
APÊNDICE C – TABELA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA CENÁRIO PROVÁVEL.....	68
APÊNDICE D – TABELA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA CENÁRIO OTIMISTA.....	69

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei número 12.305, de 2 de agosto de 2010 Art. 3º, Capítulo 1 (BRASIL, 2010), se entende rejeitos como os resíduos sólidos que serão descartados de forma ambientalmente adequada desde que não apresentem outra possibilidade após esgotadas as alternativas de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis. Sendo resíduo sólido qualquer material, substância, objeto ou bem descartado resultante da atividade humana em sociedade.

Dentro dessa perspectiva, o descarte ideal dos resíduos gerados seria através de aterros sanitários, um local em que o lixo é compactado para ocupar a menor área possível e então é armazenado em uma superfície impermeável que impede a contaminação do solo e dos lençóis freáticos. Esse tipo de descarte ainda conta com a coleta dos gases do processo, evitando que sejam despejados na atmosfera.

Uma outra modalidade de aterro é aquele denominado controlado, em que os resíduos são apenas cobertos por terra depois de despejados, sem que seja feita a devida impermeabilização do solo.

Por outro lado, uma prática bastante comum no Brasil é a disposição final de resíduos em lixões ou vazadouros a céu aberto, espaços abertos sem nenhum tipo de tratamento ou preparação para que esse material seja despejado e armazenado.

Segundo relatório da ABRELPE (CARDOSO, 2018) no Brasil foram geradas 78,4 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) em 2017, com um índice de coleta de 91%, portanto pouco mais 7 milhões de toneladas estão sendo descartadas de forma imprópria.

O gerenciamento inadequado de resíduos tem diversos impactos sobre a sociedade (GOUVEIA, 2012). O primeiro a ser considerado é a questão de saúde pública, com a propagação de doenças e substâncias tóxicas, através da contaminação da água e do solo. A poluição de cursos de água e do solo também é um problema ambiental, gerando desequilíbrios nos ecossistemas, além da contribuição que pode ter nas mudanças climáticas. Os dejetos geram uma quantidade relevante de gases de efeito

estufa (GEE) no processo de decomposição anaeróbico, dentre os quais destaca-se o metano (CH_4), apontado como um dos principais agravadores do efeito estufa.

No entanto, além dos resíduos serem descartados de maneira inadequada, eles não são aproveitados em sua totalidade antes do descarte. Os gases provenientes do processo de decomposição possuem um grande potencial de geração de energia elétrica e proporcionam uma destinação consciente de resíduos.

Geração distribuída é entendida como a produção de energia em um local próximo ao ponto em que a mesma energia será consumida. Sendo assim, trata-se de um modelo em que se gera energia elétrica sem a necessidade de transportá-la por linhas de transmissão, onde ocorrem perdas devido ao efeito Joule. Esse fator toma uma relevância ainda maior em países continentais como o Brasil, onde linhas de transmissão extensas interligam pontos muito distantes de geração e consumo.

De acordo com relatório elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2019) no ano de 2018 as usinas hidrelétricas representaram 64,7% da geração de energia elétrica do país. Enquanto isso, segundo a reportagem publicada no Canal Energia (MONTENEGRO, 2019), a segurança energética nacional está em risco devido à crise hídrica que acontece desde 2013, com os reservatórios abaixo do esperado ano após ano. Uma das causas discutidas para essa nova realidade é a mudança climática e seu impacto sobre o regime de chuvas. Seja esse o caso ou não, é importante reduzir a dependência do sistema hídrico e promover outros tipos de geração sustentável de energia elétrica.

A crise nos reservatórios hidrológicos traz outro ponto de atenção - a introdução das termoeletricas no Sistema Interligado Nacional (SIN). Trata-se de uma energia cara e danosa ao meio ambiente, utiliza combustíveis fósseis e emite GEE. As usinas movidas a vapor servem de emergência para a matriz brasileira de energia, são acionadas apenas no caso de as usinas de base não conseguirem gerar o suficiente para suprir o consumo do país (CUNHA, SOARES e SILVA, 2018), dada sua natureza não sustentável nos âmbitos econômico e ambiental. No entanto, em meio à essa crise, as usinas termoeletricas estão sendo acionadas muito mais frequentemente do que o esperado, elevando as tarifas de energia e poluindo o meio ambiente.

Nesse contexto, viu-se a oportunidade de aproveitar os resíduos orgânicos gerados em unidades de varejo alimentar. Associando-se o grande volume de resíduos que são descartados devido à sua data de validade, ou problemas de refrigeração no armazenamento, com a demanda elevada de energia nessas unidades, decidiu-se fazer uma análise de viabilidade do aproveitamento desses dejetos como produto para a geração de energia elétrica.

Este trabalho está dividido nos seguintes capítulos Revisão Bibliográfica, Metodologia, Análise de Viabilidade e Conclusão.

1.2. Objetivos Gerais

O objetivo dessa monografia é avaliar a viabilidade técnica e econômica da implementação de um sistema de biodigestão da fração orgânica dos resíduos sólidos de uma rede de varejo alimentar para a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido.

1.3. Objetivos Específicos

Os principais objetivos específicos da tese são:

- Estimativa do potencial de geração de biogás a partir do levantamento de dados de produção de resíduos orgânicos em uma rede de varejo alimentício;
- Análise de viabilidade técnica do sistema de biodigestão
- Análise de viabilidade econômica do sistema de biodigestão, com a estimativa dos custos de geração e manutenção;
- Discutir resultados, barreiras existentes e alternativas de configuração do projeto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Geração Distribuída

Geração distribuída (GD) é uma modalidade de produção de energia caracterizada pelo fato de se produzir energia em um local próximo à carga. Nessa categoria são comumente utilizadas fontes renováveis de energia como solar, eólica e biomassa, além da aplicação de cogeração qualificada, em que se usa uma mesma fonte energética para produzir mais de um tipo de energia, na maioria das vezes energia térmica e mecânica, por exemplo.

A expansão de sua participação na matriz energética de um país pode representar redução nos investimentos nas linhas de transmissão e distribuição, maior eficiência no uso da energia, devido à redução de perdas no transporte de energia, diversificação da matriz, uma vez que são utilizadas diversas fontes energéticas, e democratização do uso de energia, pelo fato de conseguir levar energia elétrica para regiões de difícil acesso onde o SIN não pode atender.

No Brasil utiliza-se o método de compensação de energia, onde o *prosumidor*, termo destinado àquele que é produtor e consumidor de energia, recebe os créditos pela sua geração a partir do momento em que esta excede o consumo do proprietário pela rede. Assim, ele pode exercer desses créditos na próxima fatura caso fique com saldo negativo, os créditos têm validade de 60 meses para serem utilizados.

Pelas regras definidas pela geração distribuída no país, a energia gerada em uma planta classificada nessa categoria que excede o consumo dos sites à que está associada, não pode ser comercializada diretamente no ambiente de contratação livre, onde consumidores e geradores podem negociar contratos de energia entre si ou através de terceiros.

Segundo a resolução normativa nº482 da ANEEL existem dois tipos de geração distribuída, caracterizados por sua capacidade instalada. A minigeração distribuída deve ter sua potência instalada entre 5 MW e 75 kW, caso seja menor do que o valor mínimo de 75 kW instalados, a geração é classificada como microgeração distribuída (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

No Brasil, até junho de 2020, tem-se mais de 3,5 GW de potência instalada em geração distribuída no país, atendendo todos os tipos de consumidores, indústria, comércio, residências e propriedades rurais. Destacam-se os estados do Rio Grande do Sul e São Paulo, como é possível observar na tabela disponibilizada pela ANEEL em que constam os números de usinas geradoras, unidades que utilizam os créditos gerados e a potência instalada. Vale ressaltar também a baixa representatividade da região norte do país no total gerado.

TABELA 1 - GERAÇÃO DISTRIBUÍDA POR ESTADO BRASILEIRO

UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA			
UF	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
AC	311	316	4.404,78
AL	1.929	2.843	25.271,93
AM	1.063	1.314	15.841,24
AP	215	269	4.846,35
BA	10.902	13.545	120.010,77
CE	7.829	10.005	135.592,70
DF	2.360	2.531	31.894,48
ES	4.807	5.790	67.880,01
GO	12.218	16.234	197.458,60
MA	2.825	3.521	34.814,00
MG	58.192	89.361	719.971,87
MS	8.664	11.395	107.674,33
MT	11.181	12.310	218.347,18
PA	4.150	4.690	45.417,09
PB	4.401	6.838	61.120,75
PE	4.509	6.707	74.123,39
PI	5.201	7.358	64.488,54
PR	17.546	17.665	283.146,06
RJ	15.572	17.926	143.875,15
RN	4.457	5.016	68.802,73
RO	514	644	15.142,32
RR	193	241	2.486,69
RS	38.183	46.360	442.273,55
SC	12.603	17.089	158.616,32
SE	1.622	1.973	17.898,08
SP	45.905	57.426	441.926,76
TO	2.252	2.317	25.755,13

FONTE: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020)

Dentre as fontes utilizadas, existe uma predominância da fonte solar fotovoltaica, representando praticamente 100% das fontes de energia empregadas. A seguir, tabela da ANEEL indicando o potencial instalado por fonte energética.

TABELA 2 - FONTE DE GD POR ESTADO BRASILEIRO

UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA			
Tipo	Quantidade	Quantidade de UCs que recebem os créditos	Potência Instalada (kW)
CGH	101	8.230	97.381,71
EOL	65	128	14.913,86
UFV	279.167	348.692	3.343.081,72
UTE	252	4.614	73.471,06

FONTE: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020)

A geração distribuída vem se apresentando como uma alternativa viável de produção de energia elétrica devido aos benefícios como menor investimento inicial, incentivo às fontes renováveis, facilidade de instalação em locais remotos onde não existe atendimento da rede de transmissão e distribuição do país.

O acesso à tipo de geração de energia em áreas de difícil acesso, onde a população não possui acesso à rede de energia elétrica pode ser apontada como uma das grandes revoluções que essa modalidade promove, a democratização do uso de energia. Devido à dificuldade de acesso e a relativa baixa demanda de energia, aliadas aos altos custos de implementação de linhas de transmissão, os habitantes dessas regiões se viam obrigados a viver sem acesso a esse recurso considerado básico pela maioria das pessoas, hoje qualquer atividade cotidiana está diretamente relacionada ao consumo de energia elétrica. Assim, a chegada de energia para essa parte da população pode promover o desenvolvimento econômico e social de regiões que antes não possuíam outra opção a não ser viver suas vidas em situação precária e totalmente defasadas com a realidade do mundo contemporâneo.

No entanto, observando-se a participação de cada estado na geração distribuída do país, fica evidente o baixo potencial instalado na região norte, região onde o SIN tem um alcance relativamente baixo quando se analisa a extensão da região e a quantidade de linhas instaladas. Assim, se faz necessário comentar a importância dos incentivos por meio de políticas públicas para que essas regiões possam buscar o desenvolvimento através do uso dessa ferramenta, melhorando as condições de vida de toda essa população às margens do SIN.

O horizonte de crescimento encontrado pela geração distribuída no país é promissor, uma vez que a participação dos 3,5 GW instalados não chega a 2% dos 170 GW instalados no país (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020). Ainda mais quando se leva em consideração que as regiões onde existe uma enorme capacidade de aplicação ainda estão em fase inicial do uso desse recurso.

Entretanto, é necessário o apoio do governo no desenvolvimento da geração distribuída fortalecendo a descentralização do uso da energia nessas áreas do país. Justamente por serem regiões isoladas, seu poder financeiro é extremamente reduzido, sendo quase inviável o investimento do capital inicial necessário para a construção de uma usina, por meio de políticas públicas é possível promover o desenvolvimento dessas áreas sem a necessidade de financiar os altos custos de instalação das linhas de transmissão e distribuição que seriam necessárias.

2.2. Resíduos Sólidos

A Lei Federal número 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e traz a definição de resíduos sólidos no capítulo 2, artigo 3º, parágrafo XVI como segue:

“[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;” (BRASIL, 2010)

Os resíduos sólidos são classificados de acordo com sua origem, setor responsável por gerar os resíduos, e nível de periculosidade, perigo que representa à sociedade. Assim, as categorias de origem são domiciliares, limpeza urbana, empreendimentos comerciais e prestadores de serviços, saneamento, industriais, serviços de saúde, construção civil, agrossilvopastoris, serviços de transportes e mineração. Já com relação à periculosidade se restringem a apenas duas classificações: perigosos,

apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, e não perigosos.

Os resíduos sólidos urbanos abrangem todo o espectro de resíduos provenientes de atividades realizadas dentro do perímetro urbano de um determinado local, podendo englobar muitas das categorias citadas.

Em 2018 foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, representando um aumento de 1% em relação ao ano anterior, destes, quase 7 milhões de toneladas não tiveram qualquer tipo de descarte apropriado. A taxa de resíduos coletados aumentou 1,66% no mesmo período, apesar da alta ser maior do que a taxa de aumento de geração, não se deixe enganar pois o país possui um dos piores índices do setor quando comparado a outros países de mesmo nível de renda. A infraestrutura para a destinação adequada de resíduos não vem acompanhando a taxa de crescimento de geração de resíduos, quando deveria ser superior para poder reduzir o déficit existente atualmente com relação à coleta. Segundo dados coletados no Panorama dos Resíduos Sólidos, um em cada doze brasileiros não são atendidos pela coleta regular de lixo. (AGÊNCIA BRASIL, 2019)

A estimativa é de que em 2030 o país alcance o valor de 100 milhões de toneladas de resíduos gerados anualmente, de acordo com a análise dos dados históricos realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe).

O problema vem se agravando devido à redução nos investimentos realizados por estado e municípios com esse tipo de serviço, em 2018 a queda registrada foi de 1,28% e a projeção para o futuro não é otimista, tendo em vista a crise financeira que assola o país, agravada pela crise financeira mundial vivenciada atualmente.

O descarte indevido de resíduos sólidos pode gerar impactos tanto ambientais como sociais, por exemplo a liberação de gás metano na atmosfera promovida pela decomposição do lixo a céu aberto, pode causar em seres humanos, quando inalado, a perda de consciência, parada cardíaca e até danos no sistema nervoso central (FERREIRA, DIAS, *et al.*, 2019). Além disso, o metano tem um potencial de efeito

estufa até 20 vezes maior do que o gás carbônico e tempo de decomposição na atmosfera de até 12 anos (ARTAXO, 2014).

A degradação do lixo também gera o chorume, líquido escuro que tem sua composição relacionada aos resíduos que o originam. Por ser líquido, é facilmente absorvido pelo solo, causando a sua poluição ou mesmo a poluição dos lençóis freáticos, quando alcança a profundidade destes. Tratam-se de danos irreparáveis que podem chegar a afetar milhares de pessoas e animais que vivem no entorno da região afetada (FERREIRA, DIAS, *et al.*, 2019).

Em um momento tão delicado para o sistema de saúde pública, cabe aqui a reflexão sobre um tema com grande potencial de impacto sanitário, investir em políticas de descarte correto de resíduos promove a proteção do meio ambiente e também da saúde da população. O controle sobre o descarte inadequado de resíduos pode representar um alívio na carga dos sistemas de saúde do país, possibilitando a melhor destinação dos recursos públicos.

2.3. Biogás

Biogás é produto da atividade biológica decorrente da decomposição de matéria orgânica em meio anaeróbico, ou seja, sem a presença de oxigênio. Trata-se de uma mistura gasosa combustível que possui como principais componentes o metano (CH_4) e o gás carbônico (CO_2), além de outros gases como o nitrogênio (N_2), amônia (NH_3), gás sulfídrico (H_2S), monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O_2). A variação volumétrica desses gases na composição do biogás depende das características apresentadas por cada resíduo utilizado e as condições em que é realizada sua decomposição. (COELHO, SANTOS, *et al.*, 2018)

As altas concentrações de metano merecem ser ressaltadas, já que possui um potencial poluidor de entre vinte e trinta vezes maior do que o gás carbônico, o que leva a um alto impacto na intensificação do efeito estufa e consequentemente no aquecimento global. Muitas vezes o metano é considerado menos nocivo devido ao seu menor tempo de residência na atmosfera, 12 anos, quando comparado com o dióxido de carbono, mais de 100 anos. No entanto, seu alto potencial de aquecimento

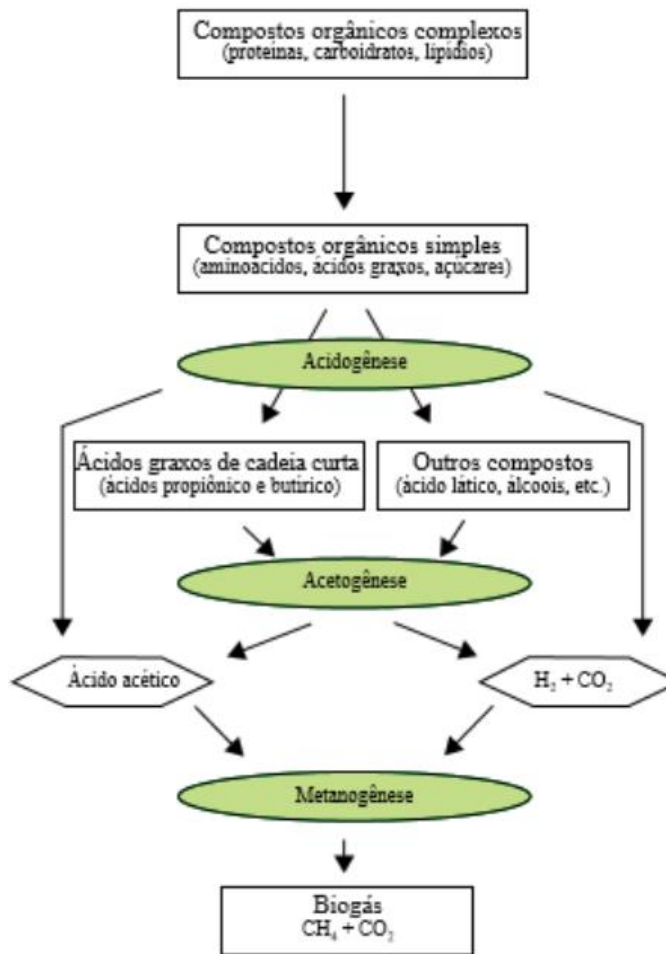
global não pode ser subestimado. Assim, destinar o metano à produção de energia representa uma importante medida na contenção das alterações climáticas. (MYHRE, 2013)

Por conta desses fatores, se torna essencial a destinação correta dos resíduos e a coleta do metano nos aterros, que em sua maioria é queimado para que seja evitada sua liberação na atmosfera. No entanto, o grande potencial energético do metano não pode ser ignorado, por esse motivo a destinação desse para a geração de energia deve ser considerado como solução para todos os aterros. Não é coerente desperdiçar quantidades grandes de combustível dessa forma sem aproveitar economicamente o recurso que existe à disposição. A viabilidade dessa técnica deve ser estudada em todo caso que uma oportunidade se apresentar.

2.4. Digestão anaeróbia

Processo de decomposição de matéria orgânica na ausência de oxigênio, composto de quatro fases: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese. A primeira fase é a hidrólise onde são liberadas enzimas que decompõem compostos orgânicos complexos transformando-os em compostos orgânicos intermediários, como resultado tem-se aminoácidos, açúcares e ácido graxo que são provenientes respectivamente de carboidratos, proteínas e lipídios. Em seguida ocorre a acidogênese, recebe esse nome em função da ação das bactérias fermentativas acidogênicas, em que os compostos intermediários são quebrados em ácidos graxos voláteis, ácidos lácticos e alcóois. Logo em seguida ocorre a acetogênese onde os produtos da fase anterior são oxidados para formar ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. A última fase, metanogênese, recebe esse nome por ser a fase responsável pela formação de metano, principal composto do biogás. Nessa fase é essencial a completa ausência de oxigênio já que as bactérias metanogênicas são anaeróbias e só conseguem realizar a conversão dos compostos para metano sob essa condição.

FIGURA 1 - PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIO



FONTE: (GIZ, 2010)

Portanto, se faz necessário ficar atento aos parâmetros em que o processo ocorre, não só em relação ao nível de oxigênio como mencionado acima. Além de serem sensíveis à presença de oxigênio, as bactérias metanogênicas também sofrem com variações de temperatura, abaixo de 10°C ou acima de 65°C o processo é interrompido. No intervalo de operação é necessário ajustar a temperatura de acordo com as características dos microrganismos envolvidos no processo para se obter maior eficiência, bactérias psicrófilas operam em temperaturas abaixo de 20°C, na faixa de 20°C a 45°C tem-se a maximização da operação de bactérias mesófilas e acima de 45°C, e abaixo de 60°C, operam as bactérias termófilas. O valor ideal do pH no sistema para promover as reações necessárias varia de acordo com a fase do processo. Nas fases iniciais se busca um pH entre 5,2 e 6,3, já as fases finais requerem um pH neutro, entre 6,5 e 8. Além disso, é preciso ressaltar que a

composição de matéria orgânica presente nos substratos tem uma influência direta na eficiência da conversão desses compostos em metano. (COELHO, SANTOS, *et al.*, 2018)

Depois, existem as substâncias inibidoras que também requerem atenção, podendo entrar no sistema através dos substratos ou serem gerados em algumas das fases descritas no processo de digestão. Esses elementos podem ser responsáveis pela desaceleração do processo de degradação ou até sua interrupção em concentrações críticas. Vale ressaltar que até mesmo a adição excessiva de substratos pode ser responsável pela inibição do processo, por conta do desbalanceamento entre microrganismos e matéria orgânica. Antibióticos e compostos de cobre, por exemplo, possuem um caráter bactericida que elimina as bactérias responsáveis pela realização da degradação. A formação de amônia livre no processo também pode levar a inibição do mesmo, sua formação pode elevar o valor de pH do sistema inviabilizando sua continuidade. Outro substrato do processo que pode paralisar a produção de biogás é o sulfeto de hidrogênio, em concentrações elevadas leva à redução de pH. (GIZ, 2010)

2.5. Codigestão anaeróbia

A codigestão anaeróbia é o processo de biodigestão em que são combinados mais de um tipo de substrato com diferentes composições. Essa prática visa aumentar a taxa de produção de biogás a partir da melhoria no equilíbrio entre nutrientes e matéria orgânica. (COELHO, SANTOS, *et al.*, 2018)

Trata-se de uma técnica importante quanto ao desempenho e viabilidade do projeto, uma vez que pode influenciar diretamente no resultado financeiro do desenvolvimento da planta. Alguns estudos apontam que pode representar um ganho de 100% dependendo dos substratos analisados. Além disso, torna possível a digestão de mais de um tipo de resíduo, contribuindo para uma melhora na taxa de destinação apropriada de mais tipos de resíduos, evitando que maiores quantidades de lixo descartados cheguem aos lixões.

3. METODOLOGIA

Nesse contexto, viu-se uma oportunidade de reaproveitamento dos resíduos gerados por uma rede de varejo alimentar com a ideia de propor um melhor uso dos mesmos. O presente trabalho vem apresentar a análise da implementação da tecnologia de produção de biogás para a geração de energia elétrica a partir dos resíduos analisados.

Para esse estudo foram considerados os dados fornecidos por uma rede de varejo alimentar na cidade de São Paulo. Assim, o estudo é composto por 331 unidades, sendo 23 hipermercados, 124 supermercados, 178 minimercados, 4 centros de distribuição e 2 sedes administrativa.

Foram fornecidos os dados de resíduos produzidos no decorrer do ano de 2019, mês a mês. Os resíduos foram separados por unidade de varejo onde já é praticada a coleta seletiva dos materiais, que foram classificados entre rejeitos, papelão, plástico, compostagem, óleo vegetal, óleo de resíduos, madeira, alumínio, ferro, vidro, metal, papel, tetra pack, PET, lâmpadas e outros.

A composição do biogás gerado a partir da digestão anaeróbia depende, entre outros fatores, da composição dos substratos utilizados no processo. A fração orgânica dos resíduos sólidos é a que possui maior potencial de geração de metano e a grande dificuldade na sua tratativa é a separação adequada e sua grande variabilidade. No caso da rede varejista, a coleta já é realizada e pode-se aproveitar desse fator para a utilização desses resíduos para a aplicação na geração de biogás.

TABELA 3 - DADOS COLETADOS DE RESÍDUOS GERADOS

Mês	Fração Orgânica (ton)
1	88,90
2	61,33
3	53,13
4	54,88
5	59,17
6	52,79
7	51,86
8	50,66
9	53,25
10	57,90
11	63,89
12	72,83

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR A PARTIR DE DADOS COLETADOS COM A REDE VAREJISTA

O Estudo de caracterização do lixo orgânico para a digestão anaeróbia de (RUIHONG ZHANG, 2007) levantou os sólidos voláteis para vários tipos de alimentos de acordo com a literatura, para os cálculos realizados aqui utilizou-se a consideração de frutas e verduras com aproximadamente 89% dos sólidos totais sendo voláteis, devido à origem dos substratos aqui considerados. Ainda é possível destacar a taxa de umidade estimada em 85%.

É possível observar a caracterização das diferentes fontes na tabela 1.

TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Fonte	Características			País	Referência
	Umidade (%)	SV/ST (%)	C/N		
Praça de alimentação	80	95	14,7	Coréia do Sul	Han e Shin (2004)
Refeitório universitário	80	94	N/D	Coréia do Sul	Kwon e Lee (2004)
Praça de alimentação	93	94	18,3	Coréia do Sul	Shin et al. (2004)
Praça de alimentação	84	96	N/D	Coréia do Sul	Kim et al. (2004)
Fontes municipais mistas	90	80	N/D	Alemanha	Nordberg e Edstrom (1997)
Fontes municipais mistas	74	90-97	N/D	Austrália	Steffen et al. (1998)
Proveniente de frutas e verduras - mercados, residências e casas de suco	85	89	36,4	Índia	Rao e Singh (2004)

*N/D - não disponível

FONTE: ADAPTADO DE (RUIHONG ZHANG, 2007)

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é um parâmetro adotado para indicar o tempo que o substrato estará sujeito à degradação dentro do reator. Muitas vezes, por questões econômicas, não se espera a degradação total do substrato para retirá-lo do

reator e dar espaço para uma nova leva de substrato. De acordo com o estudo realizado por Zhang, foi adotado um TRH de 10 dias para a análise em questão.

Além disso, a partir do levantamento realizado (RUIHONG ZHANG, 2007) pode-se observar que os substratos de frutas e verduras possuem uma relação de carbono para nitrogênio (C/N) de 36,4, valor satisfatório de acordo com estudo de designs de digestores anaeróbios para produção de biogás (A. IGONI, 2008) que constata que o valor ideal para esse índice se encontra próximo de 30.

Em levantamento realizado no estado de Pernambuco (SILVA e PALHA, 2016) com o objetivo de realizar o inventário de capacidade de geração de biogás no estado, adotou-se a premissa, obtida através do Plano de Gestão de Resíduos Sólidos do Estado de Pernambuco, de que a cada tonelada de fração orgânica de resíduos sólidos urbanos são gerados 185 m³ de biogás, com um teor de 58% de gás metano.

A partir dos dados coletados, foram realizadas as estimativas médias de volume equivalente da fração orgânica a partir de densidades médias levantadas em estudo de 1.213 kg/m³ (MICHELE DA SILVA, 2010) .

Considerando o total de resíduos orgânicos gerados pela rede, foi possível estabelecer uma média diária de geração destes. Com esse valor calculou-se a massa de sólidos voláteis de acordo com os valores levantados por Zhang e o volume médio diário de acordo com a densidade apresentada por Silva.

Os dados médios obtidos para a fração orgânica estão resumidos a seguir.

TABELA 5 - AVALIAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA

Fração Orgânica	
Massa média	1,97 ton/dia
Taxa de degradação	89 %
Umidade	85 %
Sólidos voláteis	1,76 tonSV/dia
Densidade	1213 kg/m ³
Volume médio	1,63 m ³ /dia

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR COM BASE EM (RUIHONG ZHANG, 2007) E (MICHELE DA SILVA, 2010)

De acordo com o Guia Prático do Biogás (GIZ, 2010), a digestão úmida, técnica mais difundida no mercado e com menos complicações técnicas, deve ocorrer com uma taxa de sólidos totais de 15%, levando em consideração o transporte via bombeamento do meio que deve ser exercido por uma bomba de líquidos. Dependendo do substrato pode-se chegar até 20% de sólidos totais. Em contrapartida, outros substratos podem ser misturados a no máximo 12%. Nesse estudo, será adotada uma taxa de sólidos totais de 12% no carregamento que alimenta o digestor diariamente de modo a evitar qualquer tipo de entupimento na linha.

Assim, calcula-se o volume de água que deve ser adicionado no substrato para que se adeque ao funcionamento desejado. Considerando que o valor de fração orgânica deve representar 12% do volume quando água é adicionada, estimou-se o volume de água que o processo requiere e então, a partir da densidade da água, calculou-se a massa de água do processo.

Os dados médios obtidos para a água adicionada no processo estão resumidos a seguir.

TABELA 6 - AVALIAÇÃO DA ÁGUA A SER ADICIONADA NO SISTEMA

Água	
Massa média	11,90 ton/dia
Densidade	997 kg/m ³
Volume sólidos	12 %
Volume médio	11,94 m ³ /dia

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR COM BASE EM (GIZ, 2010)

Obteve-se assim o volume total da mistura de fração orgânica de resíduos e água a ser inserida no biodigestor. A partir desse valor estimou-se uma média diária de alimentação do reator.

A partir de cálculos realizados em (VOLTOLINI, 2011) o volume da reação depende do tempo de retenção hidráulica (TRH) e da vazão de substrato adicionado continuamente (Q) nas mesmas bases de comparação, no caso, diária.

O TRH a ser adotado será o mesmo adotado por Zhang, citado anteriormente. Como foi demonstrado, o tempo de degradação considerado no estudo foi de 10 dias.

$$V_{reação} = TDH * Q$$

$$V_{reação} = 10 * 13,56$$

$$V_{reação} = 135,6 \text{ m}^3$$

Onde:

- $V_{reação}$ é o valor de volume necessário para o reator realizar a digestão [m^3]
- TDH é o tempo de retenção hidráulica necessária para que se obtenha uma quantidade satisfatória de biogás a partir do substrato [dias]
- Q é o volume da mistura adicionada diariamente no reator [m^3/dia]

Calculado o volume necessário pela reação, pode-se calcular a carga orgânica volumétrica (COV), um parâmetro operacional relevante que indica a quantidade de matéria orgânica seca inserida no volume de trabalho adotado para um determinado período de operação. Trata-se de um indicador importante na análise da capacidade de degradar o substrato do digestor. (GIZ, 2010)

A COV influencia diretamente na dinâmica do processo de digestão anaeróbia, em seu nível ótimo representa um ambiente favorável ao crescimento dos microrganismos responsáveis pela realização do processo de digestão, indicando a estabilidade do sistema estudado. Se o valor estiver abaixo do ideal pode indicar uma baixa atividade de digestão e consequentemente, um rendimento menor. Já quando se alcance valores acima do ideal pode indicar alta concentração de alguns subprodutos que podem atingir níveis em que vão interromper a reação de acontecer, como é o caso dos ácidos orgânicos voláteis. O valor de COV ideal do sistema varia de acordo com o tipo de substrato, tecnologia empregada e modelo de biodigestor. (AIRTON KUNZ, 2019)

$$COV = \frac{v * C}{V_{reação} * 100}$$

Onde:

- v representa a vazão total de substrato inserida no reator [m³/dia]
- c indica a concentração de sólidos voláteis no volume total do substrato inserido [kgSV/m³]
- $V_{reação}$ se refere ao valor calculado na equação descrita anteriormente [m³]

Pode-se observar nas tabelas 5 e 6 as massas diárias médias do ano para fração orgânica e água. Portanto o valor adotado de v é 13,56 m³/dia.

O coeficiente de concentração de sólidos voláteis é o valor de sólidos voláteis dentro do volume de carregamento diário do biodigestor, resultando 129,55 kgSV/m³.

Sendo assim, chega-se a um valor final de carga orgânica volumétrica indicada a seguir:

$$COV = 12,95 \text{ kg}_{SV}/(m^3 \cdot dia)$$

Os dados resumidos do carregamento do biodigestor encontram-se a seguir.

TABELA 7 - RESUMO DE CARREGAMENTO DO BIODIGESTOR

Carregamento Biodigestor	
Massa carregamento	13,87 ton/dia
Volume carregamento	13,56 m ³ /dia
Densidade carergamento	1,02 ton/m ³
TRH	10 dias
Concentração de sólidos voláteis	129,55 kg SV/m ³
Volume reação	135,63 m ³
Carga orgânica volumétrica	12,95 kg SV/m ³ .dia

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR COM BASE EM (AIRTON KUNZ, 2019)

3.1. Estimativa de produção de biogás

A partir das informações obtidas através da literatura, e demonstradas na seção anterior, é possível estimar o volume de metano produzido a partir da quantidade de matéria orgânica contida na mistura que será inserida no reator diariamente. Vale ressaltar que esse valor sofrerá variações de acordo com o tipo e composição dos resíduos orgânicos utilizados. No entanto, para efeitos de simplificação das estimativas, vai ser considerado um valor médio diário de produção de biogás de 185 m³/ton de resíduos orgânicos. Adotou-se também uma concentração de metano de 58% do volume total de biogás. (SILVA e PALHA, 2016)

TABELA 8 - ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Produção de biogás	
Massa de fração orgânica	1,97 ton/dia
Volume de biogás	365 m ³ /dia
Concentração de metano	58 %
Volume de metano	212 m ³ /dia

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR COM BASE EM (SILVA E PALHA, 2016)

3.2. Seleção do biodigestor

Existem três grandes tipos de reatores considerados no mercado hoje: sistemas em batelada, estágio único e estágio duplo (SCHULZ, 2015). O reator de sistema em batelada não pode ser alimentado continuamente, os mesmos são preenchidos na sua totalidade e então realizam a digestão no período de retenção hidráulica. Por não poderem ser alimentados continuamente durante sua operação, foram descartados como possibilidade nesse estudo. Já os reatores de um ou dois estágios podem operar com alimentação contínua, sendo sua única diferença o fato de que reatores com um estágio realizam todas as reações no mesmo digestor, enquanto o reator de dois estágios divide as operações realizando a fase de metanogênese em um digestor separado. Devido à sua maior simplicidade de instalação, operação e manutenção, decidiu-se por seguir o estudo com reatores de um estágio.

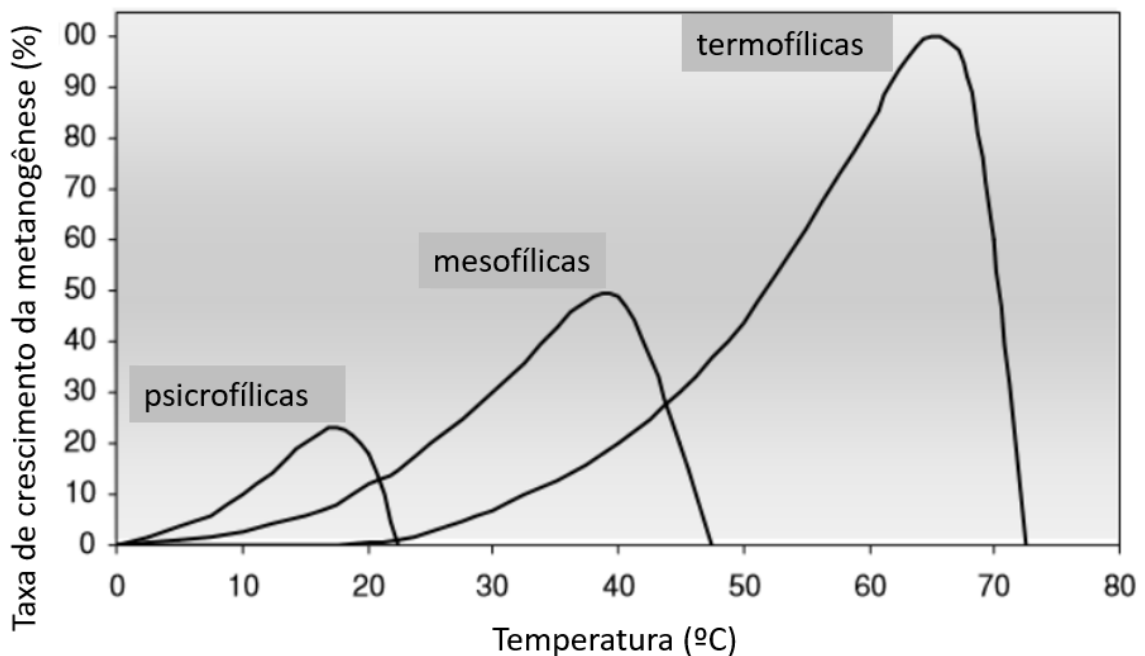
Dentro dos reatores estágio único existem diversas variações, a principal delas sendo a operação “seca” ou “úmida”. Enquanto um reator úmido requer um volume de sólidos

totais de apenas 15%, os reatores secos suportam até 40% de sólidos totais diluídos na mistura. (SCHULZ, 2015)

Levando em consideração complexidade de projeto e consequente custo elevado na execução, optou-se por um sistema de alimentação do reator com base em bombas centrífugas. Como se trata de equipamentos utilizados para o deslocamento de líquidos, deve esperar uma mistura com no máximo 15% de sólidos totais para alimentar o reator projetado.

Existem três faixas de operação de temperatura para os reatores que são: psicrófilas em que se opera com temperaturas abaixo de 20°C, mesofílicas operando com temperaturas contidas no intervalo de 25°C a 40°C e as termofílicas em que são adotadas temperaturas na faixa contida entre 50°C e 65°C. A maioria dos reatores em operação atualmente são dimensionados para operar em temperaturas mesofílicas, que possuem menor eficiência em relação às temperaturas termofílicas mas consomem menos energia devido à menor demanda térmica (CHERNICHARO, 2007).

FIGURA 2 - INFLUÊNCIA DAS DIFERENTES TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO NA EFICIÊNCIA DO PROCESSO



FONTE: ADAPTADO DE (CHERNICHARO, 2007)

Devido a seu mecanismo de mistura constante do produto no digestor que proporciona uma maior homogeneidade ao processo, obtém-se uma maior eficiência como resultado na utilização do reator contínuo de mistura completa, quando comparado à outras arquiteturas de digestores. Esse aumento na eficiência pode justificar o aumento no custo de operação devido ao consumo de energia que o motor elétrico usado para realizar o trabalho de mistura.

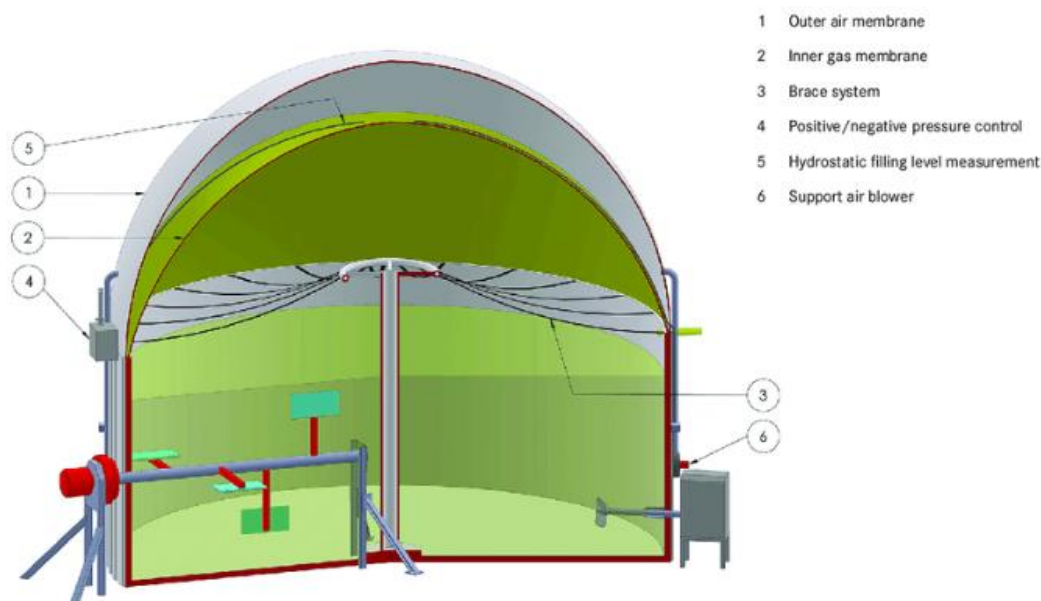
O reator contínuo de mistura completa, ou na sigla em inglês *CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor)*, tem como vantagens uma arquitetura de custo relativamente baixo, facilidade de manutenção sem necessidade de se esvaziar o reator. A principal desvantagem encontrada nesse tipo de biodigestor é o curto circuito do substrato, quando o substrato recentemente adicionado acaba saindo do reator sem atingir seu potencial de geração de biogás, para compensar a ocorrência de tais perdas é essencial que se faça a recirculação do conteúdo do biodigestor, homogeneizando o produto e aumentando a eficiência do processo.

Normalmente o reator é constituído em uma base de concreto e paredes feitas de aço ou concreto armado. Na parte superior é colocada uma estrutura impermeável a gás, normalmente feita de lona que se expande à medida que o gás é formado no interior do reator. Faz parte das características construtivas, também, agitadores que se situam no interior do reator, responsáveis pela homogeneização da mistura contida no biodigestor, realizado na maioria das vezes por pás acopladas a motores elétricos. (GIZ, 2010)

No entanto o processo de agitação pode ser realizado por meio da recirculação do biogás da parte superior para a inferior do tanque, provocando uma mistura mais homogênea, aumentando a eficiência da produção do biogás. Acredita-se que devido ao volume a ser digerido, um agitador de pás encontraria grande resistência e conseqüentemente teria um consumo de energia elétrica muito elevado quando comparado ao sistema de recirculação.

Pode-se encontrar um esquema representativo do layout do reator na figura abaixo.

FIGURA 3 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO CSTR



FONTE: (TINO BARCHAMANN, 2016)

O cálculo das dimensões do biodigestor a ser empregado no estudo parte da análise do volume da reação estimado anteriormente. De acordo com análise da literatura disponível sobre dimensionamento de tanques (ARFELLI, 2009), encontrou-se uma proporção ideal entre diâmetro (D) e altura (H) em projetos mecânicos de tanques cilíndricos. A razão D/H pode variar entre 0,5 e 1,5, mas o valor ideal que deve ser adotado preferencialmente é 1, ou seja, a altura com o mesmo valor que o diâmetro da base.

Adotando-se o valor de proporção ideal, conhecendo-se o volume do reator, pode-se calcular a altura, diâmetro e área da base do tanque do reator.

Os valores encontrados estão demonstrados na tabela a seguir.

TABELA 9 - DIMENSÕES DO BIODIGESTOR

Dimensões do biodigestor	
Volume da reação	135,6 m ³
Altura	5,6 m
Área	24,4 m ²
Raio	2,8 m

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR BASEADO EM (ARFELLI, 2009)

3.3. Seleção dos agitadores

Para seleção do processo de agitação da mistura dentro do reator foram comparados os métodos de agitação mecânica por meio de uma pá acionada através de um motor elétrico e a agitação através da recirculação do biogás através de um sistema de exaustão, succionando o gás da parte superior e insuflando na parte inferior do reator, forçando a mistura e homogeneização do substrato.

3.3.1. Agitador mecânico

A potência necessária para realizar a rotação do eixo das pás de agitação depende do número de potência, da rotação esperada, da viscosidade do fluido e o diâmetro do impelidor. O número de potência é determinado graficamente de acordo com o Número de Reynolds, (NERY, 2017).

O Número de Reynolds é utilizado para analisar o comportamento do escoamento de um fluido, se o número fica abaixo de 2.300 o fluxo é considerado laminar e se fica acima de 2.900 é considerado turbulento, valores intermediários caracterizam escoamento transitório (NERY, 2017). O cálculo do Número de Reynolds se dá pela seguinte fórmula.

$$Re = \frac{\rho * N * Di^2}{\mu}$$

Onde:

- ρ é densidade do fluido de trabalho [kg/m³]
- N é a rotação do sistema de agitação [rps]
- Di é o diâmetro do impelidor [m]
- μ é a viscosidade do fluido de trabalho [Pa.s]

Para efeito de cálculo, adotou-se a viscosidade do fluido sendo igual à da água (0,001 Pa.s). A densidade do fluido de trabalho foi definida anteriormente neste trabalho

como sendo $1,02 \text{ ton/m}^3$. A rotação deve ser baixa para que não interfira no processo de biodigestão. De acordo com o Guia do Biogás (GIZ, 2010) o valor mínimo de rotação a ser adotado é de 10 rpm, assim será empregado esse valor nos estudos pois o volume do biodigestor é relativamente pequeno com relação aos projetos de biogás desenvolvidos mundo afora. O diâmetro considerado para o impelidor foi equivalente a 33 % do diâmetro total do tanque, relação média entre diâmetro do tanque e do impulsor para esse tipo de aplicação (WARREN MCCABE, 1985) e o tipo de agitador considerado aqui é a turbina de pás planas, pois atendem a viscosidade do fluido de acordo com a tabela analisada e demonstrada a seguir.

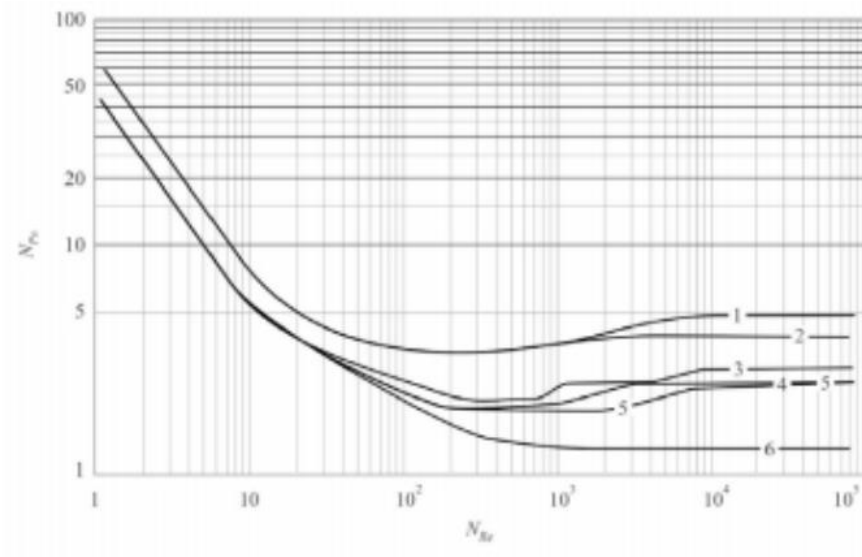
TABELA 10 - SELEÇÃO DO TIPO DE IMPULSOR

Tipo de Impulso	Viscosidade [Pa.s]
Âncora	20-1000
Hélice	0,001-10
Turbina de pás planas	0,001-30
Pás	0,1-30
Grade	1-100
Parafuso Helicoidal	3-300
Fita Helicoidal	10-2000

FONTE: ADAPTADO DE (CARVALHO, 2019)

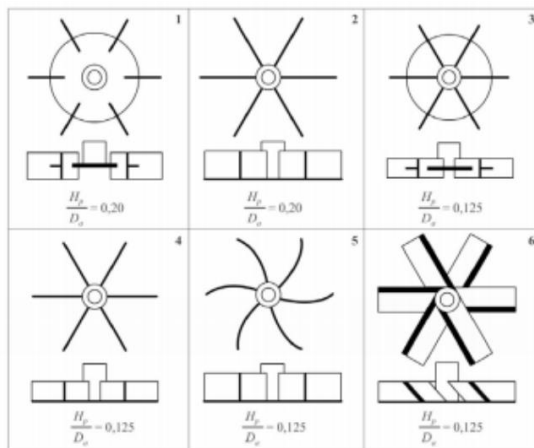
De acordo com a equação apresentada, chegou-se a um valor de Número de Reynolds igual a 3.617.436. A partir do Número de Reynolds, é possível determinar o número de potência. Trata-se de um indicador entre a relação da potência entregue pelo motor e a resistência cinética efetiva, análogo ao coeficiente de arrasto. Sua determinação é feita de acordo com o gráfico da figura 4, sendo necessário selecionar a curva correta a partir das informações contidas na figura 5. Nesse caso, o impelidor de pás retas analisado está representado pela curva 2 do gráfico de Número de Reynolds x Número de Potência.

FIGURA 4 - GRÁFICO NÚMERO DE REYNOLDS X NÚMERO DE POTÊNCIA



FONTE: (CARVALHO, 2019)

FIGURA 5 - SELEÇÃO DO TIPO DE ROTOR PARA ANALISAR CURVA EQUIVALENTE



FONTE: (CARVALHO, 2019)

Considerando que o tipo de pá estudada é a que está representada na curva 2 do gráfico, estima-se um número de potência de, aproximadamente, 4,5.

Para efeito de simplificação dos cálculos, desconsiderou-se a perda de energia na transferência de trabalho do motor para o redutor, e deste para o eixo.

A fórmula da potência requerida pelo motor elétrico está demonstrada abaixo.

$$P = Di^5 * N^3 * N_p * \rho$$

Onde:

- P é a potência total do agitador [W]
- ρ é densidade do fluído de trabalho [kg/m³]
- N é a rotação do sistema de agitação [rps]
- Di é o diâmetro do impelidor [m]
- N_p é o número de potência

Os valores adotados e os resultados encontrados estão demonstrado a seguir.

TABELA 11 - DADOS SOBRE O AGITADOR DE PÁS

Agitador de Pás	
Número de Reynolds	3.617.436
Número de potência	4,5
Diametro Impelidor	1,8 m
Rotação	10 rpm
Viscosidade	0,001 Pa.s
Potencia	110.781 W

FONTE: ADAPTADO DE (CARVALHO, 2019)

3.3.2. Recirculação

Adotou-se uma vazão média de recirculação de 100% do biogás gerado diariamente dentro do reator, sendo impulsionado da parte superior para a parte inferior do reator, forçando assim a mistura do substrato uma vez que por conta de sua densidade o gás vai voltar para a parte superior do tanque. Para efetuar esse deslocamento seria utilizada um exaustor axial com um motor elétrico acoplado.

De acordo com a vazão de recirculação determinada, foi possível dimensionar um exaustor que vai realizar essa operação. A vazão necessária para recirculação seria de 365 m³/dia, o equivalente a 15,2 m³/h. Foi selecionado um exaustor de 19 m³/h

para eventuais casos em que haja aumento de demanda. Seguem dados do produto selecionado.

TABELA 12 - ESPECIFICAÇÕES DO EXAUSTOR SELECIONADO

Dados Seleção Exaustor Recirculação	
Modelo	Maltus E30M8
Diâmetro	300 mm
Vazão	19 m ³ /h
Tensão	220 V
Corrente	0,7 A
Potência	73,54 W

FONTE: ADAPTADO DE (MALTUS, 2015)

3.3.3. Resultado

Na comparação entre os consumos de energia elétrica, o sistema de recirculação de biogás apresenta uma vantagem clara sobre o sistema de agitação mecânica, uma vez que a potência do motor acoplado no sistema de pás é mais de 1500 vezes maior do que o que vai integrado no sistema de recirculação.

Quanto ao investimento inicial, o sistema de recirculação exige menos recursos iniciais, uma vez que se trata de apenas um exaustor com duto vertical externo ao biodigestor que é conectado a uma estrutura metálica que distribuirá o biogás na parte inferior do tanque. Enquanto o sistema de agitação por pás exige a instalação de um eixo e pás que suportem a carga de momento aplicada e que sejam confeccionados em material específico para evitar corrosão. Além disso, a implementação de um

Por essa análise, concluiu-se que o sistema de recirculação do biogás seria mais econômico tanto na implementação quanto na operação.

3.4. Seleção e dimensionamento do gerador a biogás

Por conta da ampla aplicação nas plantas de biogás e pelo custo reduzido em comparação com projetos que contemplam turbinas, optou-se pela utilização da solução com motores ciclo Otto movido à biogás. Trata-se de motores de ignição por centelha acoplados a geradores de energia elétrica. O rendimento nominal desses motores fica em torno de aproximadamente 35%, caracterizando grande perda energética.

FIGURA 6 - GRUPO MOTOGERADOR A BIOGÁS



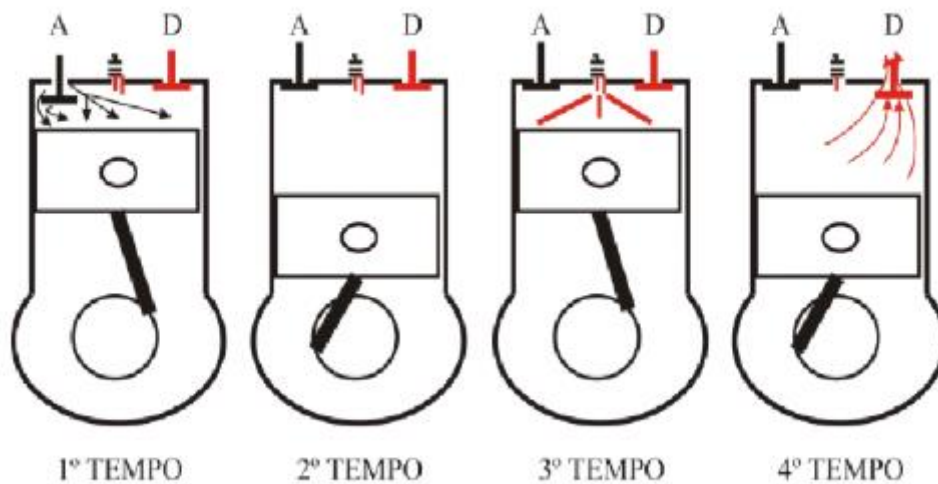
FONTE: (COELHO, SANTOS, ET AL., 2018)

O motor de combustão interna funciona através da transformação da energia química do combustível injetado em energia mecânica através da rotação do eixo de saída, que é acoplado ao eixo de um gerador, que ao girar consegue criar um campo magnético rotativo que consegue fornecer um fluxo de elétrons ordenados, que nada mais é do que uma corrente elétrica.

Combustível é injetado na câmara de combustão do motor junto com uma parcela de ar, ao realizar a compressão do fluido através da movimentação do pistão uma centelha promove a combustão dentro do cilindro, a energia gerada na combustão é responsável por movimentar o pistão para baixo que ao retornar exerce pressão para que os fumos da combustão saiam do cilindro. Ao descer novamente, a câmara é

reabastecida e o ciclo se repete, por conta dessas fases o motor é conhecido como quatro tempos. O pistão fica acoplado a um eixo de forma que sua movimentação para cima e para baixa promove a rotação do eixo.

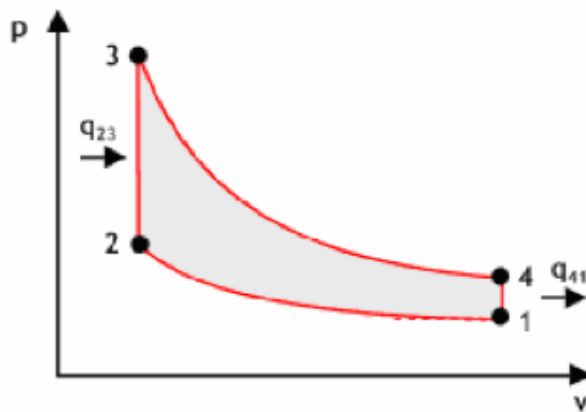
FIGURA 7 - MOTOR 4 TEMPOS



FONTE: (SOUZA, 2016)

Como descrito por Souza (SOUZA, 2016) o ciclo Otto representa as quatro etapas da combustão como um ciclo ideal composto por uma compressão isentrópica quando o pistão sobe (processo 1-2), calor transformado em trabalho na combustão movendo o pistão para baixo (processo 2-3), expansão isentrópica quando o pistão desce (processo 3-4) e rejeição de calor na exaustão dos fumos (processo 4-1).

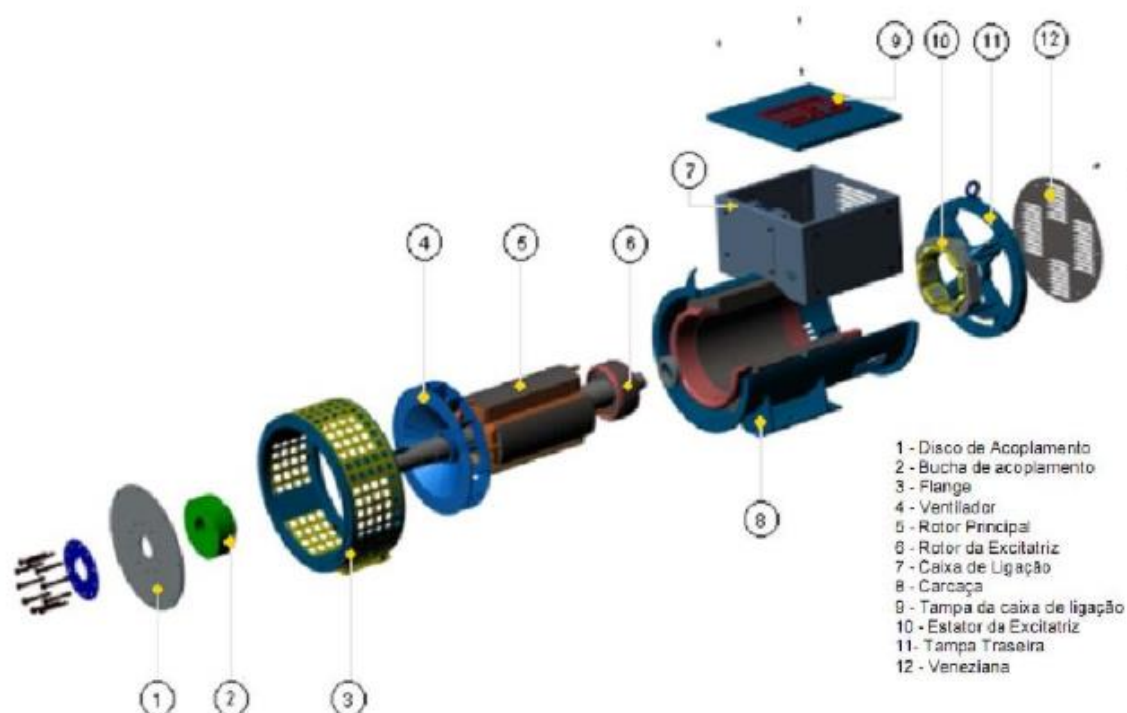
FIGURA 8 - CICLO OTTO



FONTE: (SOUZA, 2016)

A partir do processo de combustão que ocorre no motor ciclo Otto, transfere-se energia através do eixo para que o gerador realize o trabalho de geração de energia elétrica. O gerador funciona no princípio do eletromagnetismo, podendo ser dividido em duas partes, uma rotativa e uma estática. A carcaça é estática e por isso denomina-se estator, nele ficam os polos que serão excitados de acordo com o campo magnético formado pela rotação das bobinas, estas ficam no rotor que é acoplado ao eixo do motor a combustão interna e ao girar promove a excitação do estator formando uma corrente elétrica alternada.

FIGURA 9 - VISTA EXPANDIDA DE UM GERADOR



FONTE: (SOUZA, 2016)

O poder calorífico inferior é o indicador utilizado para analisar o potencial de produção de energia de um determinado combustível. Tratando-se de biogás, o PCI vai variar de acordo com a concentração de metano contido no mesmo, uma vez que é ele o responsável pela utilização de biogás como uma fonte de energia. A tabela a seguir mostra o PCI esperado de acordo com a concentração de metano no biogás. (SOUZA, 2016)

TABELA 13 - PESO ESPECÍFICO E PCI DO BIOGÁS EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METANO

Composição química do biogás	Peso específico (kg/m ³)	PCI (kcal/kg)
10 % CH ₄ e 90 % CO ₂	1,8393	465,43
40 % CH ₄ e 60 % CO ₂	1,46	2333,85
60 % CH ₄ e 40 % CO ₂	1,2143	4229,98
65 % CH ₄ e 35 % CO ₂	1,1518	4831,14
75 % CH ₄ e 25 % CO ₂	1,0268	6253,01
95 % CH ₄ e 05 % CO ₂	0,7768	10469,6
99 % CH ₄ e 01 % CO ₂	0,7268	11661,02

FONTE: (SOUZA, 2016)

No estudo adotado como referência para a produção de biogás nesse trabalho, a concentração de metano foi estimada como 58 % do biogás (SILVA e PALHA, 2016). Para efeitos de simplificação dos cálculos serão adotados os dados de PCI e peso específico levantados no Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural (SOUZA, 2016) para uma concentração de metano de 60% do biogás, com os valores considerados sendo 4.229,98 kcal/kg e 1,2143 kg/m³, respectivamente.

A partir da produção diária de biogás estimada de acordo com a tabela 8 é possível calcular o potencial de geração de energia elétrica do conjunto motogerador, a partir da equação demonstrada a seguir:

$$P_{\text{energia elétrica}} = PCI * \gamma * P_{\text{biogás}}$$

Onde:

- PCI é o poder calorífico inferior do combustível utilizado [kcal/kg]
- γ é o peso específico do combustível [kg/m³]
- $P_{\text{biogás}}$ é o volume de combustível considerado, no caso, o biogás [m³]

$$P_{\text{energia elétrica}} = 4229,98 * 1,2143 * 365$$

$$P_{\text{energia elétrica}} = 1.875.953 \text{ kcal/dia}$$

$$P_{\text{energia elétrica}} = 94 \text{ kW}$$

Levando-se em consideração as perdas provenientes do processo de transformação de energia, é necessário levar em consideração o rendimento do conjunto motogerador, que para efeitos de estudo será adotado o valor médio de 35% (CHP, 2017). Assim, pode-se chegar a uma estimativa técnica do potencial de geração que efetivamente será convertida em energia elétrica.

$$PT_{\text{energia elétrica}} = \eta * P_{\text{energia elétrica}}$$

$$PT_{energia\ elétrica} = 94 * 0,35$$

$$PT_{energia\ elétrica} = 33\text{ kW}$$

Buscando-se um gerador compatível dentre os fornecedores disponíveis no mercado chegou-se à conclusão de se utilizar um motogerador com capacidade de 35 kW da marca CHP, conforme especificação detalhada abaixo.

FIGURA 10 - ESPECIFICAÇÕES DO MOTOGERADOR

Grupo Gerador a Biogás	
Modelo	CHP60
Combustível	Biogás/ Gás Natural/ Biometano
Tensão	220/440 V
Frequência Nominal	60 Hz
Rotação Nominal	1800 rpm
Número de fases	3
Medidas	
Peso	1000 kg
Comprimento	1800 mm
Largura	810 mm
Altura	1350 mm
Motor	
Modelo	AGCO 33DTG
Configuração	3 cilindros em linha
Funcionamento	Ciclo Otto
Volume	3,3 litros
Bateria	100 Ah
Tensão do Sistema Elétrico	12 Vcc
Arrefecimento	
Sistema	A água circulação forçada
Temperatura	75-95 °C
Lubrificação	
Pressão	2,5-5 bar
Volume	6-7,5 litros
Alternador	
Modelo	WEG GTA201AI20
Tipo	Síncrono
Excitação	Escovas com bobina auxiliar
Polos	4
Fases	3
Isolação	180 °C
Proteção	IP23
Fator de Potência	0,8-1
Rotação	1800 rpm

FONTE: ADAPTADO DE (CHP, 2017)

3.5. Recuperação de calor

Devido à baixa eficiência do processo de combustão, será avaliada a possibilidade de reutilização do calor rejeitado pelo motor para o aquecimento do substrato que será inserido no biodigestor através de uma serpentina para trocar calor com o fluido que carregará o reator.

Assumiu-se aqui que a parcela de energia que não se transforma em energia elétrica pelo grupo motogerador dissipa-se na forma de calor pelo bloco do motor e pela exaustão dos gases. Sendo assim, a partir de uma eficiência estimada de 35% de conversão do biogás em eletricidade, conclui-se que 65% é dissipado na forma de calor.

De acordo com os cálculos realizados na seção anterior, o potencial de geração de energia foi estimado em 94 kW, considerando a eficiência do processo de conversão de calor em 80% (BARJA, 2006), é possível assumir que o calor disponível no processo será igual a 48,77 kW.

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, vai ser calculada a temperatura alcançada pelo fluido ao entrar no reator, lembrando que se espera uma temperatura entre 35°C e 37°C para uma maior eficiência na produção de biogás.

$$Q = \dot{m} * C_p * (T_f - T_i)$$

Onde:

- Q é o calor trocado no processo [kJ/s]
- $\dot{m}$ é a vazão mássica do fluido [kg/s]
- C_p é o calor específico do fluido [kJ/kg.K]
- T_f é a temperatura de saída do fluido [K]
- T_i é a temperatura de entrada do fluido [K]

O cálculo do calor específico da mistura será realizado considerando-se os cps de cada um dos elementos da mistura e suas respectivas porcentagens mássicas da

mistura. Dado o C_p da água como 4,2 kJ/kg.K e para a fração orgânica de frutas, legumes e verduras é 3,68 kJ/kg.K (FELLOWS, 1988). Sendo assim, através de uma média ponderada, chegou-se a um valor de calor específico estimado da mistura de acordo com a equação abaixo:

$$C_p = C_{p\text{água}} * \% \text{água} + C_{pfo} * \% fo$$

$$C_p = 4,2 * 0,84 + 3,68 * 0,14$$

$$C_p = 4,126 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}$$

Ao calcular o calor necessário para que o fluxo mássico da mistura se eleve da temperatura de 20°C para 37°C, chega-se a um valor de potência requerida pelo fluido de 11,3 kW, para realizar o ganho de temperatura desejado.

Os valores considerados e calculados estão dispostos na tabela a seguir.

TABELA 14 - CONSIDERAÇÕES E CÁLCULOS DA RECUPERAÇÃO DE CALOR

Recuperação de calor	
Calor residual da geração	61,0 kW
Eficiência Transferência Calor	80 %
Calor disponível	48,77 kW
Calor requerido	11,26 kW
Calor específico	4,13 kJ/kgK
Vazão mássica	0,16 kg/s
Variação de temperatura	17,00 K

FONTE: ELABORAÇÃO AUTOR

Conclui-se que o calor gerado no processo é suficiente para que seja utilizado no pré-aquecimento da mistura ao entrar no reator com folgas que cobrem qualquer tipo de ineficiência que possa vir a ocorrer no processo.

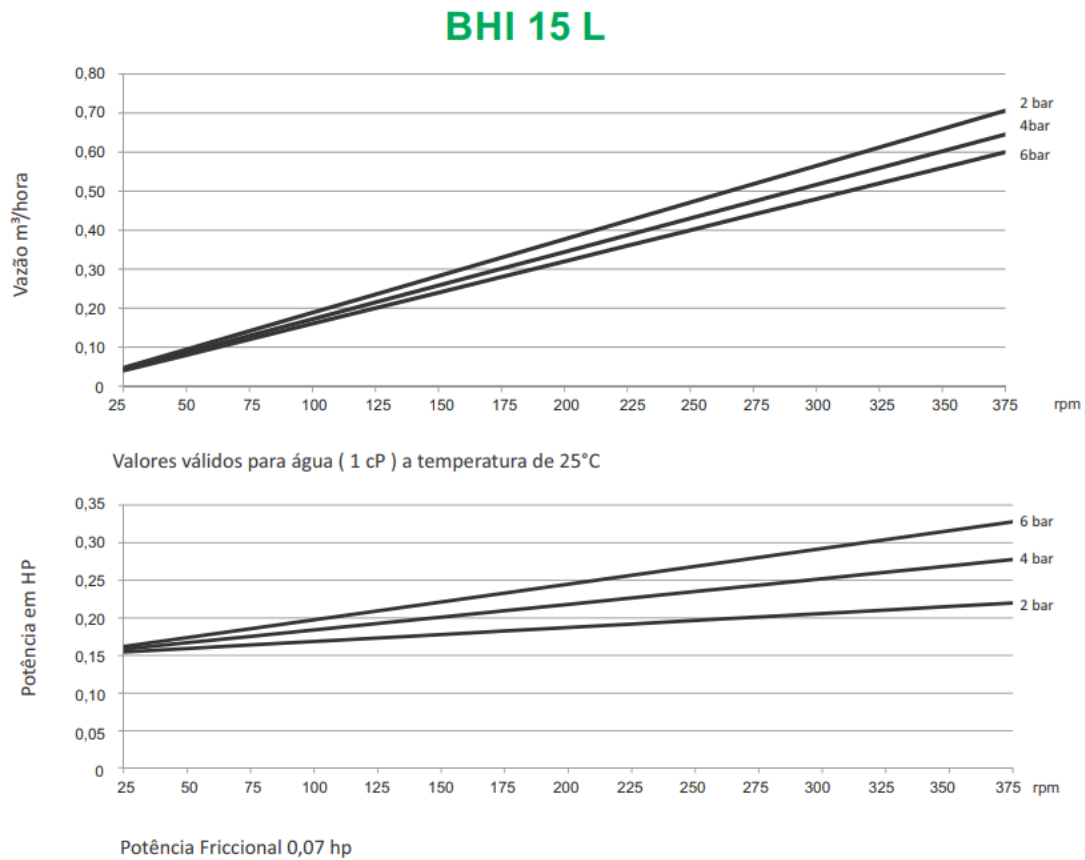
Pode-se cogitar a utilização do calor que não será utilizado para o aquecimento dos substratos, em outros processos da planta, para aquecimento de água de chuveiros para os funcionários, por exemplo.

3.6. Dimensionamento dos equipamentos auxiliares

Os resíduos orgânicos devem ser triturados para aumentar sua área de contato dentro do reator, favorecendo sua decomposição, e também para facilitar seu transporte via bombeamento para dentro do biodigestor. Assim, de acordo com a vazão necessária estimada selecionou-se um triturador de resíduos orgânicos da fabricante Trapp com motor de potência 2 cv.

O processo de deslocamento da mistura de substratos para dentro do reator requer um motor elétrico acoplado a uma bomba centrífuga que suporte a vazão do processo, estima-se uma alimentação constante de acordo com o carregamento diário médio de substrato no reator. Foi selecionada uma bomba helicoidal da marca Imbil modelo BHI 15L que atende a vazão estimada de $0,6\text{m}^3/\text{hora}$. Abaixo é possível observar o gráfico de operação da bomba selecionada.

FIGURA 11 - GRÁFICO DE OPERAÇÃO IMBIL BHI 15 L



FONTE: (IMBIL, 2013)

A pressão a ser vencida pela bomba no processo em que será aplicada é considerada como a altura de coluna de água equivalente à altura do reator, ou seja 5,6 mca. A pressão de 2 bar, equivalente a 20,4 mca, atende com tranquilidade o sistema, considerando que haverá perda de carga devido à trechos retos e cotovelos na tubulação. Assim, a rotação de operação da bomba estimada é de 300 rpm e a potência 0,2 cv.

Os dados da bomba selecionada se encontram na tabela a seguir.

TABELA 15 - DADOS DE OPERAÇÃO DA BOMBA SELECIONADA

Dados Bomba Alimentação	
Vazão Processo	0,57 m ³ /h
Vazão de Operação Da Bomba	0,6 m ³ /h
Pressão requerida	5,6 mca
Pressão bomba	2 bar
Pressão bomba	20,4 mca
Potência bomba	0,2 cv
Rotação bomba	300 rpm

FONTE: ELABORAÇÃO AUTOR

Para realizar o processo de agitação do reator, necessário para a homogeneização da mistura e para aumentar a eficiência do processo de biodigestão, de acordo com os cálculos realizados anteriormente, foi selecionado o método de recirculação de biogás ao invés das pás de agitação mecânicas, com potência estimada em 73,54 W.

Para realizar a exaustão do biogás gerado dentro do reator para que seja usado como combustível no conjunto gerador, necessita-se de uma vazão média de 11 m³/hora para atender o grupo motogerador segundo suas especificações (CHP, 2017). Assim, optou-se pelo mesmo modelo de exaustor que será utilizado na recirculação do biogás, com vazão máxima de 19 m³/h e potência de 73,54 W.

3.7. Custos de Implementação e Operação

3.7.1. Custos de implementação

No guia prático do biogás encontrou-se uma tabela com estimativa de preços, de acordo com potências indicadas, dos equipamentos necessários para a construção e a operação de uma usina movida a biogás (GIZ, 2010). Para esse levantamento serão considerados os valores obtidos a partir da adequação dos dados disponíveis no guia para a realidade da usina dimensionada nessa dissertação, resumidos na tabela 16.

Outros valores foram cotados diretamente com fornecedores como o gerador, a bomba helicoidal, o triturador e os exaustores de recirculação e alimentação do motogerador.

Foi considerada a troca da lona que reveste o a parte de cima do biodigestor, responsável pelo armazenamento do biogás gerado, a cada 5 anos. A lona fica exposta a intempéries e por ter papel crítico na eficiência do processo, necessita uma atenção maior. Seu custo foi estimado em 10% do preço total do biodigestor.

TABELA 16 - CUSTOS COM EQUIPAMENTOS

Implementação		
Depósito de substrato e carregamento	R\$	80.000,00
Biodigestor	R\$	135.874,00
Armazenamento de biofertilizantes	R\$	123.560,00
Gerador	R\$	49.500,00
Controle	R\$	183.460,00
Planejamento e licenciamento	R\$	70.000,00
Bomba helicoidal	R\$	1.500,00
Triturador	R\$	1.000,00
Exausto Biogás	R\$	250,00
Exaustor Recirculação	R\$	250,00
Total	R\$	645.394,00

FONTE: ADAPTADO DE (GIZ, 2010)

3.7.2. Custos de operação e manutenção

Os custos de manutenção e operação podem ser divididos entre custos fixos e variáveis. Os custos fixos são aqueles que se mantem inalterados ao longo do tempo, se mantém os mesmos independente do volume de produção da usina. Pode-se citar como exemplos o custo de terreno, depreciação dos equipamentos, juros de financiamentos, custos trabalhistas, entre outros. Já os custos variáveis vão ter seus valores atrelados à alguma condição que está sujeita a variações, como por exemplo custo de insumos, custo de manutenção, análises específicas etc.

Dentro da categoria de custo fixo, o valor de terreno será estimado a partir de um valor médio de metro quadrado na cidade de São Paulo de R\$ 1.000 para terrenos não construídos. De acordo com os dimensionamentos considerados, um terreno de 100

m² seria suficiente para atender as instalações necessárias. O valor de aluguel estimado na cidade fica em torno 0,2% do valor do terreno, essa será a premissa utilizada no cálculo de aluguel.

Os custos com funcionários podem ser considerados fixos devido à demanda constante de produção da usina ao longo do ano. Assim, baseou-se na estimativa de horas necessárias para cada função encontrado no guia prático do biogás. (GIZ, 2010)

TABELA 17 - HORAS NECESSÁRIAS POR ATIVIDADE

Tipo de trabalho	Unidade	Média
Controle ^a	h/semana	4,4
Registro de dados ^a	h/semana	2,7
Manutenção ^a	h/semana	3,2
Eliminação de falhas ^b	h/semana	2,7
Total	h/semana	13,0

FONTE: (GIZ, 2010)

Acredita-se que de acordo com as horas semanais apresentadas, um funcionário pode operar a usina com eficiência.

Enquanto, para efeito de cálculo, o valor de depreciação será adotado de forma geral para os equipamentos da usina, apesar de cada equipamento ter sua depreciação definida de acordo com as horas de operação e período de vida útil. A taxa de depreciação que será empregada é de 0,5% a.a. em relação ao capital inicial, de forma linear. Os custos com seguros serão estimados de acordo com o guia prático do biogás (GIZ, 2010) no valor de 0,5% a.a. do custo inicial da usina.

Os custos variáveis referentes à manutenção e reparo de equipamentos normalmente se situa entre 1% e 2% do custo total dos equipamentos, assim adotara-se um valor médio de 1,5% com relação aos custos anuais de manutenção dos equipamentos. Esse valor já está considerando trocas de componentes do grupo motogerador, como óleo, velas e cabos de velas.

Outro custo variável a ser considerado é o de consumo de energia elétrica da planta, como haverá uma equipe trabalhando localmente com computadores, iluminação e ar condicionado, estima-se um consumo por parte desses funcionários de 200 kWh/m².ano (BORGSTEIN, 2013). Considerando-se uma área administrativa de 20 m² para monitoramento e controle da usina, chega-se a um consumo anual de 4.000 kWh/ano. A demanda equivalente de 0,46 kW foi calculada estimando que esse consumo se dá de forma linear no decorrer dos 365 dias do ano, com 24 horas de consumo.

TABELA 18 - CONSUMO ELÉTRICO ÁREA ADMINISTRATIVA

Consumo elétrico ADM	
Demanda ADM	456,62 W
Consumo ADM	4.000 kWh/ano

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR

Existe ainda o consumo elétrico proveniente de equipamentos auxiliares do processo de produção de biogás como o triturador, o exaustor de recirculação de biogás, a bomba para deslocamento do produto para dentro do reator e o ventilador para exaustão do biogás. De acordo com o dimensionamento realizado e considerando uma operação da planta de 24 horas em 365 dias do ano, com um fator de operação de 85% devido às paradas necessárias para manutenção.

Segue tabela detalhando as potências e o total de consumo dos equipamentos auxiliares ao processo de biodigestão.

TABELA 19 - DETALHAMENTO DOS EQUIPAMENTOS AUXILIARES

Consumo elétrico auxiliar	
Helicoidal	147 W
Triturador	1470 W
Recirculação	73,54 W
Exaustão	73,54 W
Demanda auxiliares	1764,08 W
Consumo	13.135 kWh/ano

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR

3.7.3. Tarifa de energia elétrica

O horário de ponta definido pela concessionária local corresponde ao horário de pico de consumo da rede elétrica, consequentemente atribui-se um valor diferente ao consumo realizado durante esse período, com duração de 3 horas. Portanto, os cálculos de custo referente ao consumo de eletricidade por parte da usina se basearam na divisão do consumo de ponta e fora ponta, como representando 30% e 70% do total consumido, respectivamente.

Para o cálculo do consumo elétrico deve-se considerar o subgrupo alta tensão, A4. A modalidade deve ser definida entre verde ou azul, enquanto a primeira tem valor fixo para a demanda em horários de ponta e fora ponta, a segunda tem valores diferentes para consumo e demanda em horários de ponta e fora ponta. Adotando valores de tarifa obtidos nas faturas de energia da distribuidora Enel na cidade de São Paulo para o subgrupo selecionado, montou-se a tabela comparativa abaixo.

TABELA 20 - COMPARAÇÃO ENTRE MODALIDADES TARIFÁRIAS

Modalidade tarifária	Demanda P [R\$/kW]	Consumo P [R\$/kWh]	Demanda FP [R\$/kW]	Consumo FP [R\$/kWh]	Consumo Total Planta [R\$]
Verde	15,48	1,02429	15,48	0,31625	789,28
Azul	23,13	0,46212	15,48	0,31625	599,82

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR

A partir da comparação realizada, optou-se pela seleção da modalidade azul, uma vez que representa um custo mensal menor para a planta.

3.7.4. Consolidação dos custos envolvidos no processo

Segue abaixo a consolidação de todos os custos anuais relacionados à operação e manutenção da planta.

TABELA 21 – CONSOLIDAÇÃO DOS CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

O&M	Anual	
Vaiáveis		
Consumo elétrico equipamentos	R\$	5.546,20
Consumo elétrico administrativo	R\$	1.651,61
Funcionários	R\$	21.600,00
Manutenção	R\$	13.242,09
Fixos		
Terreno	R\$	2.400,00
Depreciação	R\$	4.414,03
Seguros	R\$	4.414,03
Total	R\$	53.267,96

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR

Os custos referentes ao transporte dos resíduos para a central de geração de biogás foram desconsiderados pois hoje a empresa já arca com esse custo para que os rejeitos sejam destinados à aterros.

4. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A seguir, são apresentados alguns conceitos de análise de viabilidade financeira de projetos adotados nesse estudo.

4.1. Conceitos Financeiros

4.1.1. Taxa Mínima de Atratividade

A taxa mínima de atratividade (TMA) é o percentual mínimo que um investidor exige de retorno ao financiar um projeto (PARENTE, 2017). Essa deve superar a taxa livre de risco do mercado, normalmente associada à taxa de retorno de investimentos de renda fixa com uma margem estipulada como prêmio de mercado, associada ao nível de risco atrelado ao empreendimento. A TMA normalmente corresponde à soma desses dois fatores considerados.

4.1.2. Custo de Capital Total

Após a determinação da TMA, que representa o custo de capital próprio investido no projeto, deve-se calcular o custo total do capital empregado, considerando-se o custo de capital de terceiros, obtidos através de dívida. A taxa de juros da dívida vai variar de acordo com os fatores estipulados em contrato entre as partes interessadas. O custo de capital total é calculado através da média ponderada dos custos de capital envolvidos no projeto (PARENTE, 2017).

4.1.3. Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto é o cálculo do valor presente do fluxo de caixa estimado pelo projeto no momento presente, ou seja, a diferença entre os custos e as receitas futuras do projeto à valor presente (PARENTE, 2017). O desconto é realizado de acordo com a taxa do custo de capital total adotada na análise, trata-se da representação do risco do projeto no decorrer do tempo, trazido à valor presente.

4.1.4. Payback

O *payback* é um indicador dentro da análise de projetos que serve para informar em quanto tempo o valor inicialmente investido será retornado para o investido. Existem dois tipos de *payback* que são empregados na análise de viabilidade de projetos, o simples e o descontado. A diferença entre as duas modalidades é basicamente a consideração do custo de capital no caso descontado, por conta disso é considerado mais realista do que a análise do *payback* simples.

O cálculo de *payback* consiste, basicamente em dividir o capital inicial pela receita acumulada do empreendimento, retornando o número de anos que a receita vai levar para restituir o investimento. Enquanto no cálculo de *payback* simples se utiliza a somatória do fluxo de caixa dentro do horizonte projetado, sem trazê-los a período presente, no caso do *payback* descontado, vai entrar na consideração o fator de desconto do capital no tempo, através da taxa de custo de capital total. (PARENTE, 2017)

4.1.5. Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno (TIR) é um dos parâmetros utilizados para avaliar se o cálculo financeiro do projeto apresenta um resultado satisfatório. A TIR representa a taxa de desconto do fluxo de caixa do projeto para que o VPL seja nulo (PARENTE, 2017). Essa taxa é responsável por indicar a rentabilidade do investimento, considerando as receitas futuras para projetar a renda presente. Assim, é possível comparar a TIR com a taxa de custo de capital do projeto e avaliar se ela o supera, em caso negativo o projeto é inviável financeiramente.

4.2. Premissas

Os cálculos de análise de viabilidade vão partir de algumas premissas adotadas de acordo com o cenário econômico atual do país, caracterizado pela grande incerteza em torno de investimentos e taxas de juros nas mínimas históricas. Assim, serão adotados valores um pouco mais conservadores, uma vez que essa situação seja

superada a tendência é que alguns índices voltem a um patamar um pouco mais condizente com a realidade econômica do país.

A operação da usina foi considerada para um período de 20 anos, uma vez que após esse período grande parte do maquinário existente deverá ser substituída por novos equipamentos, com diferentes tecnologias, provavelmente exigindo alterações estruturais e de layout do projeto inicial. Com uma ressalva para a lona que reveste o biodigestor, responsável pelo armazenamento do biogás, que deve ser substituída a cada 5 anos.

O índice de nacional de preços ao consumidor (IPCA) foi considerado em um patamar de 3% a.a. de acordo com as projeções consultadas (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2020) para os próximos anos considerando uma taxa fixa durante todo o período de operação da usina, apesar de ser uma afirmação que não condiz com a realidade, não é possível afirmar com assertividade a variação da inflação ao longo de 20 anos. O IPCA foi utilizado para a correção anual dos gastos com funcionários, manutenção e custos com seguros.

O índice geral de preços do mercado (IGP-M) é responsável por ditar as variações nos preços de imóveis, e nesse estudo foi utilizado para ajustar o valor de aluguel anualmente. A taxa adotada foi de 4% a.a de acordo com projeções realizadas pelo órgão federal responsável (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2020).

Ao se tratar da tarifa de energia elétrica, cabe a mesma explicação dada acima sobre os valores adotados para o IPCA, o momento atual não permite uma previsão segura das variações que virão nos próximos 20 anos. Por conta disso, adotou-se uma correção anual de 5,5 % para o valor de tarifa ponderada média de energia adotada.

A tabela com valores de premissas e cálculos se encontra no Apêndice A.

Para os cálculos de custo de capital foram feitas as seguintes suposições, com três cenários possíveis a serem analisados, pessimista, provável e otimista. A taxa livre de risco adotada foi de 4,5% a.a. de acordo com o valor avaliado do CDI dos últimos 12 meses (ITAU BBA, 2020). O prêmio de mercado foi avaliado como sendo 8% a.a. O custo do capital próprio investido no projeto considerado é resultado da soma desses dois valores apresentados, resultando uma taxa de 12,5% a.a. Enquanto isso, o custo

da dívida, valor financiando por terceiros, apesar de a taxa básica de juros do país ter caído consideravelmente nos últimos meses, foi considerado como 9% a.a.

O valor aplicado será 90% composto por investimento de terceiros, enquanto apenas 10% será utilizado do capital próprio, uma vez que o cenário é favorável ao usufruto de empréstimos e financiamentos devido às taxas mais atrativas. Com essas suposições feitas, chegou-se a um valor de custo de capital total de 9,4 % a.a. no cenário provável.

TABELA 22 - COMPOSIÇÃO DO CAPITAL POR CENÁRIO PROPOSTO

Cálculo Taxa de Desconto	Pessimista	Provável	Otimista
Taxa Livre de Risco	5,5%	4,5%	3,5%
Prêmio de Mercado	6,5%	8,0%	9,5%
Custo de Capital Próprio	12,0%	12,5%	13,0%
Custo da Dívida	11,0%	9,0%	7,0%
Dívida/Capital Próprio	90,0%	90,0%	90,0%
Custo de Capital Total	11,1%	9,4%	7,6%

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR

Para o cálculo de receita gerada pela usina, deve-se atentar ao fato de que a tarifa a ser utilizada deve constar a tarifa de disponibilidade cobrada pelas distribuidoras nessas situações. A tarifa de disponibilidade remete ao custo da infraestrutura de cabeamento instalada e que torna possível a injeção de energia na rede e o recebimento de energia elétrica pela planta de geração. Assim, mesmo que não se pague a parcela de tarifa de energia da parcela de eletricidade consumida da concessionária, a parcela de uso do fio ainda é cobrada e deve ser considerada nos cálculos.

Como analisado anteriormente, a tarifa ponderada adotada para o consumo da usina é R\$ 0,42 por quilowatt-hora, obtida através da divisão do valor pago mensalmente em reais pelo valor consumido mensalmente em quilowatt-hora. A parcela disso que é referente à tarifa de energia representa 66% da tarifa total, como a tarifa cobrada pela utilização da infraestrutura de abastecimento de energia ainda será mantida na conta, o desconto proporcionado pela geração da usina deve contabilizar uma tarifa equivalente à parcela cobra de consumo de energia, apenas. Sendo assim,

considerou-se, proporcionalmente, uma tarifa para a geração de biogás de R\$ 0,28/kWh. Esses cálculos estão detalhados na tabela a seguir.

TABELA 23 - ESTIMATIVA TARIFA BIOGÁS

Modalidade tarifária	Demanda ponta TUSD	Demanda fora ponta TUSD	Consumo TUSD	Custo TUSD	Custo TE	Custo Total	Parcela TUSD	Tarifa biogás
A4	R\$/kW	R\$/kW	R\$/kWh	R\$	R\$	R\$	%	R\$/kWh
Azul	23,23	15,48	0,08	200,16	399,66	599,82	0,33	0,28

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR

4.3. Resultados

Estabelecidos e inseridos os valores de premissas na planilha de cálculos financeiros da usina, foi possível levantar alguns indicadores sobre a viabilidade econômica da sua implementação e operação. Como explicado na seção anterior foram criados três cenários de análise, um provável, um otimista e um pessimista. Em todos os cenários obteve-se o mesmo valor de TIR, uma vez que esta independe das taxas de desconto adotadas como premissa, a taxa interna de retorno calculada para o projeto é de 8%. No cenário otimista, com a taxa de custo de capital total estimada em 7,6%, a TIR encontrada é aceitável e o projeto seria aprovado de acordo com esse critério. Enquanto no cenário provável, com o custo de capital total considerado de 9,4%, o projeto não pode ser considerado com desempenho satisfatório, já fica que o retorno estimado fica abaixo do custo de capital empregado. Da mesma forma que no cenário pessimista, o projeto também seria descartado a partir dessa análise.

Fazendo uma análise do cenário provável, onde o projeto tem taxa de retorno abaixo da expectativa, pode-se destacar alguns resultados obtidos. O VPL do projeto é negativo R\$ (63.030), valor que inviabiliza o projeto, uma vez que aponta para prejuízo na execução do projeto. O *payback* simples é de 11,63 anos e o *payback* descontado não pode ser calculado, uma vez que o projeto não se paga no final do período analisado.

O cenário otimista, obviamente apresentou números mais atrativos, como por exemplo o VPL que foi calculado em R\$ 43.623, seu *payback* descontado é de 18,78 anos, é

um tempo muito longo de espera pelo retorno do investimento, só possibilitaria um ano de operação gerando lucros para os investidores.

Por último, o cenário pessimista obteve um VPL negativo de R\$ (147.713). Ou seja, nesse cenário o investidor estaria reduzindo seu patrimônio no decorrer do tempo ao invés de incrementá-lo. O *payback* descontado não pôde ser calculado pois o tempo de operação da usina não é suficiente para que o investimento realizado seja retornado pelas receitas.

A seguir é apresentada a tabela resumo dos resultados obtidos em cada cenário.

TABELA 24 - RESUMO DOS TRÊS CENÁRIOS AVALIADOS

Sumário	Provável	Pessimista	Otimista
VPL [R\$]	(63.029,7)	(147.712,6)	43.622,6
TIR [%]	8%	8%	8%
Payback Simples [Anos]	11,63	11,63	11,63
Payback Descontado [Anos]	N/A	N/A	18,78

FONTE: ELABORAÇÃO DO AUTOR

Os cálculos financeiros de cada um dos cenários pessimista, provável e otimista, se encontram nos Apêndices B, C e D, respectivamente.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados para os diferentes cenários apresentados no capítulo anterior, pode-se concluir que o projeto desenvolvido não apresenta viabilidade econômica. A taxa interna de retorno muito próxima da taxa de custo de capital adotada no cenário otimista já é um bom indicativo da inviabilidade de execução do projeto, normalmente espera-se que a taxa encontrada tenha uma relativa margem de segurança sobre a margem de custo, para que exista a conversão de lucro no empreendimento. Como nesse caso apenas o cenário otimista apresentou retorno, fica clara a inviabilidade encontrada. Além disso, o *payback* descontado, que é praticamente equivalente a todo o período de operação considerado para a planta, é outro indicador muito ruim encontrado apenas no cenário otimista, enquanto os outros cenários não apresentaram fluxo de caixa descontado positivo em todo o período de operação analisado. Sendo assim, mesmo no cenário otimista em que se prevê lucro na operação, o risco envolvido no projeto é alto, principalmente quando comparado ao retorno projetado do empreendimento. Com uma relação custo benefício ruim no cenário otimista, o projeto não é indicado para execução nos moldes apresentados.

No entanto, vale ressaltar que os valores empregados para os custos de implementação foram obtidos através de referências de 2010. Sabe-se que, com o passar dos anos, o desenvolvimento e o aprimoramento das tecnologias de produção e implementação em larga escala levam a uma tendência de redução nos preços dos produtos. Assim, é possível que os valores estimados estejam acima da realidade atual. Ainda assim, com a forte desvalorização enfrentada pelo real no ano de 2020, os preços de produtos produzidos fora do Brasil sofreram um aumento acentuado, dificultando a importação de equipamentos, o que pode ter equilibrado a projeção dos preços de equipamentos tornando-os mais aderentes à realidade presente.

Ao mesmo tempo, as taxas de juros alcançaram mínimas históricas em 2020, o que favorece o cenário de viabilização de projetos, uma vez que os juros de investimento livres de risco caíram em consequência desse fato. Mesmo assim, a dificuldade em se prever o comportamento dessas taxas ao longo dos anos gera um cenário de incerteza e instabilidade na economia, o que não é benéfico para os negócios.

Subprodutos como o calor residual de processo e os biofertilizantes, podem se tornar uma fonte de renda para a usina, porém, nesse estudo, não foram levados em consideração. A sua inclusão nos cálculos pode fazer com que todos os indicadores financeiros melhorem consideravelmente.

Outro fator que poderia reverter os resultados negativos encontrados é a coleta seletiva realizada pela rede varejista em que esse estudo se baseou, segundo o representante com quem foram coletados os dados, a coleta seletiva de materiais orgânicos hoje representa aproximadamente 10% de todos os resíduos gerados pela companhia. Estima-se que dentre os 90% dos resíduos que não são separados, pelo menos 50% seja composto por matéria orgânica.

Sendo assim, poderia se considerar uma produção de biogás praticamente cinco vezes maior do que a estimada nesse estudo. Consequentemente os custos considerados também se elevariam, mas não se pode descartar a possibilidade de que esse incremento na carga de produção de biogás poderia melhorar os resultados financeiros obtidos.

Uma análise local específica pode ser realizada nas unidades de negócio para entender se seria viável a instalação de uma unidade geradora de biogás dentro do espaço físico disponível, que normalmente é reduzido. O corte nos custos com transporte dos resíduos seria um fator positivo para o projeto, além do reaproveitamento do calor do processo para utilização interna na unidade de supermercado. Um *chiller* de absorção pode ser acoplado como sistema de cogeração, já que existe uma demanda elevada de refrigeração dos produtos do supermercado e da climatização das áreas internas, representando em média 70% do consumo de energia elétrica de uma loja.

Acredito que além da análise financeira, deve-se levar em consideração os aspectos ambientais do projeto. A produção de energia elétrica a partir do uso de resíduos é uma forma eficiente e inteligente de tratar uma questão preocupante na sociedade contemporânea, a destinação do lixo. Ao analisar os indicadores de geração de resíduos por pessoa nota-se que esse número vem aumentando a cada ano que passa, seja em países desenvolvidos ou em desenvolvimento. Além disso, a população global vem aumentando sua taxa de crescimento o que leva à conclusão

de que os números absolutos de geração de resíduos também aumentam consideravelmente. Atrelando-se essas constatações ao fato de que a área utilizada para a destinação desses resíduos gerados também deve aumentar, enquanto a disponibilidade de terra é finita, configura-se um dilema quanto ao uso das terras disponíveis, já que o aumento populacional consequentemente leva ao aumento de áreas cultivadas para produção de alimentos. Enquanto isso, o crescimento populacional e a geração de resíduos por indivíduo não apresentam sinais de estabilização.

Portanto, se faz necessário encontrar meios de reaproveitamento desses resíduos para que eles possam ser aproveitados ao máximo e fazer com que retornem de maneira menos impactante ao ecossistema.

A usina de geração a biogás é uma maneira de se aproveitar o potencial energético dos resíduos e produzir um rejeito que pode ser também utilizado de maneira produtiva na produção de alimentos, como fertilizantes de terras agrárias, incrementando o retorno financeiro para seus investidores.

Outro aspecto ambiental de extrema importância é a de liberação de gases de efeito estufa, enquanto os aterros liberam uma alta quantidade de metano na atmosfera, um gás com potencial de aquecimento global mais de vinte vezes maior do que o dióxido de carbono, a usina a biogás vai utilizar esse gás como combustível para a geração de energia elétrica liberando dióxido de carbono na atmosfera. De acordo com o ciclo natural do carbono, as moléculas de carbono presentes no dióxido de carbono da exaustão, proveniente do processo de queima, são as mesmas moléculas de carbono que a biomassa absorveu durante seu processo de fotossíntese, o que implica na neutralidade de emissões com relação ao dióxido de carbono. Ou seja, não existe um acréscimo de dióxido de carbono na atmosfera devido à operação da usina.

Considerando-se que a utilização da planta a biogás evita o acionamento das usinas termelétricas, utilizadas para balancear o sistema interligado nacional quando as usinas de base não são suficientes para atender à demanda, pode-se estimar as toneladas de dióxido de carbono evitadas com a utilização desse processo. Levando em consideração que a usina tem uma potência instalada total de 33 kW elétricos, estima-se que seriam evitadas as emissões de 84.110 toneladas de CO₂ por ano. Por

esse cálculo, seria necessário o plantio de aproximadamente 600 árvores para neutralizar essas emissões, no mesmo período.

Diante desse cenário em que diversos benefícios relacionados à aplicação dessa técnica de geração de energia são apresentados, mostrando o quanto é importante que esse método seja replicado nas diferentes regiões do país, em conjunto com a constatação da sua inviabilidade financeira de acordo com o estudo realizado, fica evidente a importância da ajuda das iniciativas públicas. Se faz necessária a atuação dos governos municipais, estaduais e federal para auxiliar o desenvolvimento e a aplicação dessa tecnologia em larga escala.

Inúmeras ações podem ser tomadas no tocante à viabilidade dos projetos de geração de energia a partir do biogás, como por exemplo a aplicação de subsídios fiscais na implementação e operação destas usinas, isenção ou redução nos impostos de importação dos equipamentos em que foram empregadas as tecnologias que representam o estado da arte no mercado. No campo da produção tecnológica, podem ser feitos investimentos na criação de programas de incentivo para pesquisas acadêmicas, visando fomentar os estudos científicos em torno do tema, de modo a impulsionar a produção nacional dos equipamentos utilizados nesse tipo de projeto. Além disso, podem ser reforçadas e atualizadas as leis e políticas de gestão dos resíduos, de forma a promover uma maior conscientização das empresas e da população, proporcionando um montante maior de matéria prima disponível para essa aplicação. Trata-se de uma proposta de reformulação do sistema de gestão de resíduos como o conhecemos, de forma a se estabelecer um sistema que seja mais eficiente e benéfico para todas as partes envolvidas.

Partindo do conteúdo exposto nesse trabalho pode se afirmar que a usina de geração de eletricidade a partir do biogás proveniente de resíduos orgânicos representa uma redução relevante no impacto ambiental, se apresentando tanto como uma alternativa ao descarte indevido de resíduos sólidos urbanos quanto na redução das emissões de gases de efeito estufa. Com a ajuda das políticas públicas é possível contornar os baixos retornos da perspectiva financeira, de modo a disseminar essa tecnologia em favor de uma sociedade mais eficiente e consciente com relação aos recursos que utiliza e descarta.

BIBLIOGRAFIA

A. IGONI, M. A. C. E. S. O. S. P. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Applied Energy**, p. 9, 2008.

AGÊNCIA BRASIL. Geral: Notícias. **Agência Brasil**, 8 novembro 2019. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-11/brasil-gera-79-milhoes-de-toneladas-de-residuos-solidos-por-ano>>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482**. Brasília. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Geração Distribuída. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 19 Agosto 2020. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Estadual.asp>. Acesso em: 20 agosto 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Geração Distribuída. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 19 Agosto 2020. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acesso em: 20 agosto 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Sala de imprensa: Geração. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 10 Janeiro 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-alcanca-170-mil-megawatts-de-capacidade-instalada-em-2019/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 20 agosto 2020.

AIRTON KUNZ, R. L. R. S. A. C. D. A. **Fundamentos da Digestão Anaeróbia, Purificação do Biogás, Uso e Tratamento do Digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

ALDAY, T. **Desenvolvimento de um protótipo para produção de ar comprimido, água gelada e água quente a partir da utilização de gás natural**. São Paulo. 2011.

ANNA FERNANDÉZ, A. S. X. F. Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetal origin. **Biochemical Engineering Journal**, p. 7, 2005.

ARFELLI, S. **Projeto mecânico e análise térmica de tanques cilíndricos verticais com agitação e superfície de troca de calor**. Bauru. 2009.

ARTAXO, P. Dossiê Clima- Mudanças Climáticas e o Brasil. **Revista USP**, p. 6-12, 2014.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Sistema de Expectativas do Mercado. **Banco Central do Brasil**, 2020. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/expectativas/publico/?wicket:interface=:1:>>. Acesso em: 8 24 2020.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Sistema de Expectativas do Mercado. **Banco Central do Brasil**, 2020. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/expectativas/publico/?wicket:interface=:2:>>. Acesso em: 8 24 2020.

BARJA, G. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. Brasília. 2006.

BORGSTEIN, E. **Benchmarking e etiquetagem energética em uso**. São Paulo. 2013.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**, Brasília, DF, agosto 2010.

CARDOSO, W. Relatório revela aumento da destinação inadequada de resíduos sólidos. **Going Green**, 2018. Disponível em: <<http://goinggreen.com.br/2018/09/20/relatorio-revela-aumento-na-destinacao-inadequada-de-residuos-solidos/>>. Acesso em: 21 abr 2020.

CARVALHO, L. **Agitação e Mistura**. Lorena. 2019.

CASSINI, S. T. (. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás**. Rio de Janeiro. 2003.

CDH. Produtos. **CDH**, 2017. Disponível em: <<https://chpbrasil.com.br/produtos/chp60>>. Acesso em: 20 agosto 2020.

CHERNICHARO, C. A. D. L. **Reatores Anaeróbicos**. Londres: IWA Publishing, 2007.

COELHO, S. T. et al. **Tecnologia de Produção e Uso de Biogás e Metano**. São Paulo: Synergia Editora, 2018.

CUNHA, K. B. D.; SOARES, M.; SILVA, A. F. D. **A termelétricidade no novo contexto do setor elétrico: a importância da avaliação de impactos ambientais**. Instituto de Energia e Meio Ambiente. São Paulo, p. 41. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019**. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, p. 254. 2019.

FELLOWS, P. J. Propriedades dos alimentos e teoria do processamento. In: FELLOWS, P. J. **Tecnologia de processamento de comida**. Londres: Elsevier, 1988.

FERREIRA, R. S. et al. Impactos socioambientais causados pelo descarte incorreto de resíduos sólidos urbanos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, p. 51-72, 2019.

GIZ. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. Distrito Federal. 2010.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **SciELO**, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232012000600014>. Acesso em: 21 abr 2020.

HIDANI, R. Y. **Estudo técnico-econômico de geração de energia elétrica a partir de resíduos gerados nas instalações da CEAGESP**. São Paulo. 2017.

IMBIL. Catalogos. **Imbil**, 2013. Disponível em: <<http://www.imbil.com.br/Imbil/Ingles/Upload/Catalogos/BHI.pdf>>. Acesso em: 3 agosto 2020.

ITAU BBA. Análises econômicas: Projeções. **Itau**, 2020. Disponível em: <<https://www.italu.com.br/italubba-pt/analises-economicas/projecoes/longo-prazo-agosto-2020#>>. Acesso em: 8 24 2020.

MALTUS. Produtos. **maltus**, 2015. Disponível em: <[https://www.maltus.com.br/produtos.php?subcategoria=Exaustores%20Axiais%20\(Industrial\)](https://www.maltus.com.br/produtos.php?subcategoria=Exaustores%20Axiais%20(Industrial))>. Acesso em: 20 agosto 2020.

- MICHELE DA SILVA, G. D. S. **Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados**. Fortaleza.
- MONET, F. **An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Waste**. Remade Scotland. [S.l.]. 2003.
- MONTENEGRO, S. Cenaário da crise hídrica amplia discussão sobre segurança energética. **Canal Energia**, Brasília, DF, p. 6, mar 2019.
- MYHRE, G. . D. S. F.-M. B. W. C. J. F. J. H. D. K. J.-F. L. D. L. B. M. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: _____ **Climate Change 2013: The Physical Science Basics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- NERY, L. **Concepção e dimensionamento de um eixo para um tanque agitado industrial**. Fortaleza. 2017.
- PARENTE, V. Análise de investimento aplicada a projetos de energia. In: NETO, A. H., et al. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. p. 336-353.
- PINTO, R. D. O. **Avaliação da digestão anaeróbia na bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado**. Florianópolis. 2006.
- RANGARAJ GANESH, M. T. P. S. A. L. J. P. S. J. P. D. Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Comparision of start-up, reactor stability and process performance. **Wast management**, 26 março 2014. 10.
- ROBINSON TAVONI, P. M. R. C. Modelos Clássicos e Fracionários de Gompertz e Bertalanffy. In: _____ **Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics**. Gramado: SBMAC, 2017.
- RUIHONG ZHANG, H. E.-M. K. H. F. W. G. L. C. C. P. G. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresource Technology**, p. 7, 2007.
- SCHULZ, F. **Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. São Leopoldo. 2015.
- SEBRAE. Finanças: Viabilidade Financeira. **Sebrae**, 2020. Disponível em: <<https://m.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/pr/artigos/viabilidade-financeira,4e8ccd18a819d610VgnVCM1000004c00210aRCRD>>.
- SERGIO PONSÁ, T. G. A. S. **Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with several pure organic co-substrates**. Barcelona. 2011.
- SILVA, S. P. R. D. et al. Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção. **VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica**, Agosto 2015. 9.
- SILVA, S. P. R. D.; PALHA, M. D. L. A. P. F. **Inventário da Biomassa Produtora de Biogás de Pernambuco**. Recife. 2016.
- SOUZA, S. N. M. D. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. Cascavel. 2016.
- TINO BARCHAMANN, E. M. M. D. M. S. S. W. F. J. J. L. M. N. **Expanding the flexibility of biogas plants - substrate management, schedule synthesis and economic assessment**. [S.l.]. 2016.

VOLTOLINI, C. A. **Co-digestão anaeróbia e potencial de geração de biogás de lodos de esgotos e resíduos sólidos orgânicos**. Florianópolis. 2011.

WARREN MCCABE, J. S. P. H. **Unit Operations of Chemical Engineering**. [S.l.]. 1985.

ZAMBELLI, R. A. **Relatório referente à prática de determinação da densidade de óleos**. Fortaleza. 2009.

APÊNDICE A – PREMISSAS FINANCEIRAS

Projeto Biogás												
x Premissas												
		2020E	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E			
Variáveis												
Consumo elétrico planta	[kW/ano]	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00			
Consumo elétrico planta	[R\$/ano]	-5.516,70	-5.847,70	-6.198,56	-6.570,48	-6.964,71	-7.382,59	-7.825,54	-8.295,08			
Consumo elétrico administrativo	[kW/ano]	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00			
Consumo elétrico administrativo	[R\$/ano]	-1.680,00	-1.780,80	-1.887,65	-2.000,91	-2.120,96	-2.248,22	-2.383,11	-2.526,10			
Manutenção	[R\$/ano]	-9.680,91	-9.971,34	-10.270,48	-10.578,59	-10.895,95	-11.222,83	-11.559,51	-11.906,30			
Funcionários	[R\$/ano]	-21.600,00	-22.248,00	-22.915,44	-23.602,90	-24.310,99	-25.040,32	-25.791,53	-26.565,28			
Fixos												
Seguros	[R\$/ano]	-3.226,97	-3.323,78	-3.423,49	-3.526,20	-3.631,98	-3.740,94	-3.853,17	-3.968,77			
Aluguel	[R\$/ano]	-2.400,00	-2.496,00	-2.595,84	-2.699,67	-2.807,66	-2.919,97	-3.036,77	-3.158,24			
Depreciação	[R\$/ano]	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97			
Potencial de geração	[kW]	33	33	33	33	33	33	33	33			
Tarifa Biogás	[R\$/kWh]	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,40	0,42			
Tarifa Energia	[R\$/kWh]	0,42	0,45	0,47	0,50	0,53	0,56	0,60	0,63			
IPCA	[% a.a.]	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%			
IGPM	[% a.a.]	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%			
Inflação da Energia	[% a.a.]	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%			
Produção Energia Mensal	[kW/mês]	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760			
Produção Energia Anual	[kW/ano]	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120			
Projections												
2028E	2029E	2030E	2031E	2032E	2033E	2034E	2035E	2036E	2037E	2038E	2039E	2040E
13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00	13.135,00
-8.792,78	-9.320,35	-9.879,57	-10.472,34	-11.100,68	-11.766,73	-12.472,73	-13.221,09	-14.014,36	-14.855,22	-15.746,53	-16.691,32	-17.692,80
4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00	4.000,00
-2.677,66	-2.838,32	-3.008,62	-3.189,14	-3.380,49	-3.583,32	-3.798,32	-4.026,22	-4.267,79	-4.523,86	-4.795,29	-5.083,01	-5.387,99
-12.263,49	-12.631,39	-13.010,33	-13.400,64	-13.802,66	-14.216,74	-14.643,24	-15.082,54	-15.535,02	-16.001,07	-16.481,10	-16.975,53	-17.484,80
-27.362,23	-28.183,10	-29.028,59	-29.899,45	-30.796,44	-31.720,33	-32.671,94	-33.652,10	-34.661,66	-35.701,51	-36.772,55	-37.875,73	-39.012,00
-4.087,83	-4.210,46	-4.336,78	-4.466,88	-4.600,89	-4.738,91	-4.881,08	-5.027,51	-5.178,34	-5.333,69	-5.493,70	-5.658,51	-5.828,27
-3.284,57	-3.415,95	-3.552,59	-3.694,69	-3.842,48	-3.996,18	-4.156,02	-4.322,26	-4.495,15	-4.674,96	-4.861,96	-5.056,44	-5.258,70
-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97	-3.226,97
33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
0,45	0,47	0,50	0,53	0,56	0,60	0,63	0,67	0,71	0,75	0,80	0,85	0,90
0,67	0,71	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,01	1,07	1,13	1,20	1,27	1,35
3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%
6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%
23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760	23.760
285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120

APÊNDICE B – TABELA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE
FINANCEIRA CENÁRIO PESSIMISTA

Projeto Biogás								
Avaliação de Fluxo de Caixa Descontado								
Fluxo de Caixa Descontado								
Em BRL milhares	2020E	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E
(-) Capex [R\$]	(645.394,0)	-	-	-	-	(13.587,4)	-	-
Produção Energia Anual [KWh/ano]		285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120
(+) Receita Anual Média [R\$]	-	79.833,6	84.623,6	89.701,0	95.083,1	100.788,1	106.835,4	113.245,5
% crescimento		-	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%
(-) Custo O&M [R\$]		(44.104,6)	(41.667,6)	(43.291,5)	(44.978,8)	(46.732,3)	(48.554,9)	(50.449,6)
(-) Depreciação [R\$]		(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)
(-) Fluxo de Caixa	(645.394,0)	32.502,1	39.729,0	43.182,6	46.877,4	37.241,5	55.053,5	59.568,9
FC Acumulado	(645.394,0)	(612.892,0)	(573.162,9)	(529.980,3)	(483.102,9)	(445.861,5)	(390.808,0)	(331.239,1)
WACC	-	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%
FC Descontado (BRL milhares)	(645.394,0)	29.254,8	32.186,9	31.489,6	30.768,6	22.001,7	29.275,3	28.511,6
FC Descontado Acumulado	(645.394,0)	(616.139,2)	(583.952,3)	(552.462,7)	(521.694,2)	(499.692,5)	(470.417,2)	(441.905,6)

Projections												
2028E	2029E	2030E	2031E	2032E	2033E	2034E	2035E	2036E	2037E	2038E	2039E	2040E
-	-	(13.587,4)	-	-	-	-	(13.587,4)	-	-	-	-	-
285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120
120.040,2	127.242,6	134.877,2	142.969,8	151.548,0	160.640,9	170.279,3	180.496,1	191.325,9	202.805,4	214.973,7	227.872,2	241.544,5
6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%
(52.419,8)	(54.468,6)	(56.599,6)	(58.816,5)	(61.123,2)	(63.523,6)	(66.022,2)	(68.623,3)	(71.331,7)	(74.152,3)	(77.090,3)	(80.151,1)	(83.340,5)
(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)
64.393,5	69.547,1	61.463,2	80.926,4	87.197,9	93.890,3	101.030,2	95.058,4	116.767,2	125.426,1	134.656,5	144.494,1	154.977,0
(266.845,6)	(197.298,5)	(135.835,2)	(54.908,9)	32.289,0	126.179,3	227.209,5	322.267,8	439.035,0	564.461,1	699.117,6	843.611,7	998.588,7
11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%
27.741,5	26.968,2	21.452,3	25.423,5	24.656,8	23.896,7	23.144,8	19.601,1	21.671,8	20.953,1	20.247,6	19.556,1	18.879,3
(414.164,2)	(387.195,9)	(365.743,6)	(340.320,1)	(315.663,2)	(291.766,5)	(268.621,7)	(249.020,6)	(227.348,8)	(206.395,7)	(186.148,0)	(166.591,9)	(147.712,6)

APÊNDICE C – TABELA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE
FINANCEIRA CENÁRIO PROVÁVEL

Projeto Biogás												
Avaliação de Fluxo de Caixa Descontado												
x Fluxo de Caixa Descontado												
Em BRL milhares												
	2020E	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E				
(-) Capex [R\$]	(645.394,0)	-	-	-	-	(13.587,4)	-	-				
Produção Energia Anual [kWh/ano]		285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120				
(+) Receita Anual Média [R\$]	-	79.833,6	84.623,6	89.701,0	95.083,1	100.788,1	106.835,4	113.245,5				
% crescimento		-	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%				
(-) Custo O&M [R\$]		(44.104,6)	(41.667,6)	(43.291,5)	(44.978,8)	(46.732,3)	(48.554,9)	(50.449,6)				
(-) Depreciação [R\$]		(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)				
(-) Fluxo de Caixa	(645.394,0)	32.502,1	39.729,0	43.182,6	46.877,4	37.241,5	55.053,5	59.568,9				
FC Acumulado	(645.394,0)	(612.892,0)	(573.162,9)	(529.980,3)	(483.102,9)	(445.861,5)	(390.808,0)	(331.239,1)				
WACC	-	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%				
FC Descontado (BRL milhares)	(645.394,0)	29.723,0	33.225,4	33.025,7	32.786,0	23.819,5	32.201,2	31.863,1				
FC Descontado Acumulado	(645.394,0)	(615.671,0)	(582.445,6)	(549.419,9)	(516.633,9)	(492.814,4)	(460.613,2)	(428.750,1)				
Projections												
2028E	2029E	2030E	2031E	2032E	2033E	2034E	2035E	2036E	2037E	2038E	2039E	2040E
-	-	(13.587,4)	-	-	-	-	(13.587,4)	-	-	-	-	-
285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120
120.040,2	127.242,6	134.877,2	142.969,8	151.548,0	160.640,9	170.279,3	180.496,1	191.325,9	202.805,4	214.973,7	227.872,2	241.544,5
6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%
(52.419,8)	(54.468,6)	(56.599,6)	(58.816,5)	(61.123,2)	(63.523,6)	(66.022,2)	(68.623,3)	(71.331,7)	(74.152,3)	(77.090,3)	(80.151,1)	(83.340,5)
(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)
64.393,5	69.547,1	61.463,2	80.926,4	87.197,9	93.890,3	101.030,2	95.058,4	116.767,2	125.426,1	134.656,5	144.494,1	154.977,0
(266.845,6)	(197.298,5)	(135.835,2)	(54.908,9)	32.289,0	126.179,3	227.209,5	322.267,8	439.035,0	564.461,1	699.117,6	843.611,7	998.588,7
9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%	9,4%
31.498,6	31.110,7	25.143,6	30.274,9	29.831,9	29.374,9	28.906,0	24.871,9	27.939,6	27.445,3	26.945,7	26.441,9	25.935,3
(397.251,5)	(366.140,8)	(340.997,2)	(310.722,2)	(280.890,3)	(251.515,4)	(222.609,4)	(197.737,5)	(169.797,9)	(142.352,6)	(115.406,9)	(88.965,0)	(63.029,7)

APÊNDICE D – TABELA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE
FINANCEIRA CENÁRIO OTIMISTA

Projeto Biogás												
Avaliação de Fluxo de Caixa Descontado												
Fluxo de Caixa Descontado												
Em BRL milhares	2020E	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E				
(-) Capex [R\$]	(645.394,0)	-	-	-	-	(13.587,4)	-	-				
Produção Energia Anual [kWh/ano]		285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120				
(+) Receita Anual Média [R\$]	-	79.833,6	84.623,6	89.701,0	95.083,1	100.788,1	106.835,4	113.245,5				
% crescimento		-	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%				
(-) Custo O&M [R\$]		(44.104,6)	(41.667,6)	(43.291,5)	(44.978,8)	(46.732,3)	(48.554,9)	(50.449,6)				
(-) Depreciação [R\$]		(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)				
(-) Fluxo de Caixa	(645.394,0)	32.502,1	39.729,0	43.182,6	46.877,4	37.241,5	55.053,5	59.568,9				
FC Acumulado	(645.394,0)	(612.892,0)	(573.162,9)	(529.980,3)	(483.102,9)	(445.861,5)	(390.808,0)	(331.239,1)				
WACC	-	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%				
FC Descontado (BRL milhares)	(645.394,0)	30.206,4	34.315,0	34.663,5	34.971,5	25.820,5	35.474,1	35.672,5				
FC Descontado Acumulado	(645.394,0)	(615.187,6)	(580.872,7)	(546.209,2)	(511.237,7)	(485.417,2)	(449.943,1)	(414.270,6)				
Projections												
2028E	2029E	2030E	2031E	2032E	2033E	2034E	2035E	2036E	2037E	2038E	2039E	2040E
-	-	(13.587,4)	-	-	-	-	(13.587,4)	-	-	-	-	-
285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120	285.120
120.040,2	127.242,6	134.877,2	142.969,8	151.548,0	160.640,9	170.279,3	180.496,1	191.325,9	202.805,4	214.973,7	227.872,2	241.544,5
6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%	6,0%
(52.419,8)	(54.468,6)	(56.599,6)	(58.816,5)	(61.123,2)	(63.523,6)	(66.022,2)	(68.623,3)	(71.331,7)	(74.152,3)	(77.090,3)	(80.151,1)	(83.340,5)
(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)	(3.227,0)
64.393,5	69.547,1	61.463,2	80.926,4	87.197,9	93.890,3	101.030,2	95.058,4	116.767,2	125.426,1	134.656,5	144.494,1	154.977,0
(266.845,6)	(197.298,5)	(135.835,2)	(54.908,9)	32.289,0	126.179,3	227.209,5	322.267,8	439.035,0	564.461,1	699.117,6	843.611,7	998.588,7
7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%	7,6%
35.838,0	35.972,3	29.545,6	36.153,9	36.204,2	36.229,4	36.230,9	31.681,5	36.168,0	36.106,0	36.025,2	35.926,7	35.811,4
(378.432,6)	(342.460,2)	(312.914,6)	(276.760,7)	(240.556,6)	(204.327,2)	(168.096,3)	(136.414,7)	(100.246,7)	(64.140,7)	(28.115,5)	7.811,1	43.622,6