

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS, GESTÃO E  
SUSTENTABILIDADE – PPGTGS (MESTRADO PROFISSIONAL)

JOÃO CARLOS CHRISTMANN ZANK

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE  
DECISÃO EM PROJETOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA COM BIOGÁS**

**FOZ DO IGUAÇU  
2019**

**JOÃO CARLOS CHRISTMANN ZANK**

**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO  
EM PROJETOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM  
BIOGÁS**

Trabalho apresentado como requisito parcial à aprovação em exame de defesa da dissertação do **Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Tecnologias, Gestão e Sustentabilidade** da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Área de Concentração: Gestão e Sustentabilidade.

Orientadora: Profa. Doutora Renata Camacho Bezerra

**FOZ DO IGUAÇU  
2019**

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Zank, João Carlos Christmann

Método para avaliação e apoio à tomada de decisão em projetos para a geração de energia elétrica com biogás / João Carlos Christmann Zank; orientador(a), Renata Camacho Bezerra, 2019.

113 f.

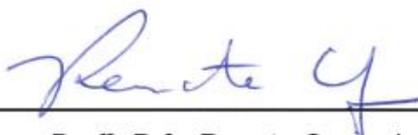
Dissertação (mestrado profissional), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias, Gestão e Sustentabilidade, 2019.

1. Biogás. 2. Sustentabilidade. 3. Métodos qualitativos. 4. Unidade geradora. I. Bezerra, Renata Camacho. II. Título.

**JOÃO CARLOS CHRISTMANN ZANK**

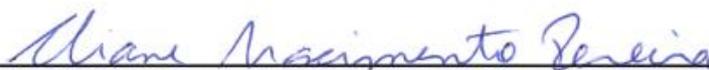
**MÉTODO PARA AVALIAÇÃO E APOIO À TOMADA DE DECISÃO  
EM PROJETOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM  
BIOGÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias, Gestão e Sustentabilidade - PGTGS da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, aprovado pela banca examinadora:



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Renata Camacho Bezerra  
Professora do PGTGS – Campus de Foz do Iguaçu



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Eliane Nascimento Pereira  
Professora do PGTGS – Campus de Foz do Iguaçu



---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Janine Padilha Botton  
Professora da Universidade Federal da Integração Latino Americana



---

Prof. Dr. Eduardo Cesar Dechechi  
Coord. do Mestrado Profissional em Tecnologias, Gestão e Sustentabilidade  
Portaria Nº3279/2018-GRE - UNIOESTE – Campus de Foz do Iguaçu

Foz do Iguaçu, 16 de dezembro de 2019

Aos meus pais, Paulo e Nilza, por sempre acreditarem em mim e por terem abdicado de suas vidas em prol das realizações e da felicidade de seus filhos.

À minha amada esposa Debora e à minha filha Manuela, por todo amor, incentivo, apoio e compreensão. Nada disso teria sentido se vocês não existissem na minha vida.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por permitir a realização de tantos sonhos. Agradeço a oportunidade de errar, compreender, aceitar, aprender e crescer. Agradeço ainda por permitir me permitir partilhar minha existência com uma família tão especial, enfim, obrigado por tudo.

À Prof<sup>ª</sup>. Renata, pela orientação, profissionalismo, dedicação e compreensão, que foram muito importantes. Obrigado por acreditar em mim, pelos elogios e pelas palavras de incentivo. É certo que não chegaria neste ponto sem o seu apoio. Você foi e está sendo muito mais que orientadora: para mim será sempre uma amiga.

Aos membros da banca examinadora, Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>a</sup> Eliane Nascimento Pereira e Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>a</sup> Janine Padilha Botton, que tão gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta dissertação. Ao Prof. Dr. Elídio de Carvalho Lobão e Prof. Dr. Eduardo César Dechechi, agradeço ainda pelas conversas breves, porém importantíssimas.

Aos amigos, colegas e professores do PPGTGS, pelos trabalhos e disciplinas realizados em conjunto e, principalmente, pela preocupação e apoio constantes. Obrigado pelo convívio, amizade e apoio demonstrado.

Ao CIBiogás, em especial aos diretores Rodrigo Régis de Almeida Galvão, Rafael Gonzalez e Samuel Campos, e gestores Marcelo Alves de Souza e Thiago José Lippo de França, pela oportunidade concedida para a realização deste curso e desta dissertação.

Aos colegas do CIBiogás, da Engenharia & Operações, em especial, ao William, Larissa, Regean, Felipe, Thiago, Daniela, Daiana, Natali e Vanderlei.

Aos gestores das unidades pesquisadas, em especial ao Srs. Mario Sossela Filho (Marinho) e Emerson, pela abertura de informações sobre a Fazenda Iguaçu – Star Milk. À família Colombari, Sr. José Carlos, Pedro e Fernanda, pela receptividade. Ao Sr. Romário Schefer e o “Grilo”, pelas informações e o atendimento na Cerâmica Stein.

À minha família, tios(as), primos(as), cunhados(as) e à minha sogra, Dona Marli, por apoiarem e compreenderem minha ausência em diversos momentos.

À minha mãe e ao meu pai deixo um agradecimento especial, pelas lições de amor, companheirismo, caridade, dedicação, abnegação e compreensão que vocês me dão a cada novo dia. Sinto-me orgulhoso e privilegiado por ter pais tão especiais. E ao meu irmão, sempre pronto a me apoiar em tudo nesta vida.

À minha esposa Debora, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em tantos momentos difíceis desta caminhada, “...quem tá no mestrado sabe como é...”. Obrigado por permanecer ao meu lado, mesmo sem as nossas conversas rotineiras, sem a atenção devida e depois de tantos momentos de lazer perdidos. Obrigado pelo presente de cada dia, pelo seu sorriso e por saber me fazer feliz.

À minha filha Manuela, por todo amor e alegria que você sempre me deu. A sua existência é o reflexo mais perfeito da existência de Deus.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta pesquisa, o meu sincero agradecimento.

“Fazer, todos os dias, as mesmas coisas e esperar resultados diferentes é a maior prova de insanidade”.

Albert Einstein

## RESUMO

ZANK, J. C. C. (2019). *Método para avaliação e apoio à tomada de decisão em projetos para geração de energia elétrica com biogás*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologias, Gestão e Sustentabilidade - PGTGS, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.

A elaboração e diagnóstico de arranjos tecnológicos para geração de energia elétrica com biogás são complexos e requerem uma base de conhecimento ampla e multidisciplinar. Quando os arranjos técnicos e econômicos são inadequados para a realidade local, implicam em resultados insatisfatórios para o investidor e para o sistema elétrico, além de perda de prestígio para uma solução que por vezes provou-se sustentável. Um projeto implantado de forma inadequada, por sua vez, gera impactos negativos para as instituições implementadoras, de fomento e para a sociedade. Além do aspecto econômico, em que pode incorrer em prejuízos financeiros, tal implementação equivocada representa desperdício de recursos técnicos que comprometem a sustentabilidade das instituições envolvidas. O objetivo deste trabalho é apresentar um método para apoio ao diagnóstico, análise e tomada de decisão sobre arranjos técnicos e econômicos de projetos para geração de energia elétrica com biogás. O estudo foi realizado considerando a análise em 03 (três) Unidades de Demonstração de geração de energia elétrica com biogás já implantadas no Oeste do Estado do Paraná. Para identificar os fatores que influenciam sobre a tomada de decisão nestes projetos foram utilizados métodos de análise qualitativa, com o Diagrama de Ishikawa e a matriz SWOT, que permitem uma análise de causa e efeito participativa e a descrição dos fatores internos e externos que influenciam o projeto por meio da aplicação da matriz SWOT na forma reduzida. Com o resultado da análise foi proposto um método que agregou a experiência e lições aprendidas como orientações ao diagnóstico e elaboração de novos arranjos. As reflexões a respeito das temáticas que envolvem os projetos de geração de energia elétrica com biogás, bem como, o fato de fornecer à sociedade uma ferramenta para avaliação e diagnóstico dos arranjos existentes de forma segura e célere, popularizando e viabilizando tais soluções em menor prazo, é o avanço ao término desta pesquisa.

**Palavras-chave:** Biogás, Sustentabilidade, Métodos Qualitativos, Unidade Geradora.

## ABSTRACT

ZANK, J. C. C. (2019). *Method for evaluation and decision support in biogas to power projects*. Master's Dissertation - Postgraduate Program in Technologies, Management and Sustainability - PGTGS, State University of Western Paraná - UNIOESTE, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil.

The elaboration and diagnosis of technological arrangements for the generation of electric energy with biogas are complex and require a wide and multidisciplinary knowledge base. About the technical and economic arrangements that are inadequate for the local reality implies to an unsatisfactory result for investors and for the electric system as well as loss of prestige for a solution that has sometimes proved sustainable. An inadequately implemented project, in turn, generates negative impacts for the implementing, development and social institutions. In addition to the economic aspect, in which it may incur financial losses, such a mistaken implementation represents a waste of technical resources that jeopardize the sustainability of the institutions involved. The objective of this work is to present a method to support the diagnosis, analysis and decision making on technical and economic arrangements of projects for the generation of electric energy with biogas. The study has been carried out considering the analysis in 03 (three) Demonstration Units of electric energy generation with biogas already implanted in the West of the State of Paraná. To identify the factors that influence decision making in these projects, qualitative analysis methods were used, with the Ishikawa Diagram and SWOT matrix, which allow a participatory cause and effect analysis and a description of the internal and external factors influencing the project through the application of reduced SWOT. With the result of the analysis has been proposed a method that should aggregate the experience and lessons learned as guidelines to the diagnosis and elaboration of new arrangements. The reflections on the issues surrounding biogas to power projects, as well as the fact that it provides society with a tool for the evaluation and diagnosis of existing arrangements in a safe and fast way, popularizing and making feasible such solutions in a shorter term, is the advance towards the end of this research.

**Keywords:** Biogas, Sustainability, Qualitative Methods, Power Generation.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA SOBRE BIOGÁS .....	6
2.1. Arranjos tecnológicos com biogás.....	6
2.2. Características do biogás .....	7
2.3. Conversão de biogás em energia elétrica .....	8
2.4. Eficiência dos geradores .....	10
2.5. Marco regulatório .....	12
3. METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	19
3.1. Diagrama de Ishikawa para análise de falhas .....	20
3.2. Análise SWOT reduzida para identificação de cenários .....	21
4. DESENVOLVIMENTO .....	24
4.1. Unidade 1 – Fazenda Iguaçu – STAR MILK.....	24
4.2. Unidade 2 – Granja São Pedro – Colombari .....	41
4.3. Unidade 3 – Cerâmica Stein – Sr. Romário Schaefer.....	44
4.4. Unidade 1 – Fazenda Iguaçu – Nova aplicação do questionário.....	46
4.5. Comparações e Reflexões.....	49
4.6. Proposição de questionário, versão 2.0 .....	62
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	67
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71
APÊNDICE 1 .....	76
APÊNDICE 2 .....	85

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1: Ilustração das rotas tecnológicas para produção e uso do biogás. ....	6
Figura 2: Rotas tecnológicas para conversão de biomassa em energia elétrica. ....	9
Figura 3: Imagem ilustrativa do processo metodológico seguido. ....	19
Figura 4: Modelo do diagrama de Ishikawa, espinha de peixe ou 6Ms. ....	21
Figura 5: Representação gráfica da análise SWOT. ....	22
Figura 6 : Ilustração do formato proposto para a matriz SWOT reduzida. ....	23
Figura 7: Diagrama de Ishikawa para a Unidade 1 e primeira visita. ....	27
Figura 8: Imagem Ilustrativa da Granja São Pedro com seus dois biodigestores.....	42
Figura 9: Imagem ilustrativa da Cerâmica Stein, granjas de suínos e biodigestor.....	44
Figura 10: Imagem ilustrativa da situação do recinto de geração na Fazenda Iguaçu no dia 25 de setembro, onde pode-se visualizar uniade geradora de 330 kVA e paineis de proteção. ....	47
Tabela 1: Matriz SWOT reduzida para falhas identificadas com o Diagrama de Ishikawa.....	28
Tabela 2: Questionário preenchido do projeto Fazenda Iguaçu – Star Milk. ....	40
Tabela 3: Questionário preenchido pelo Sr. Pedro Colombari, constando de resultados da unidade Granja São Pedro – Colombari. ....	43
Tabela 4: Questionário preenchido pelo Sr. Romário Schaefer, constando de resultados da unidade Cerâmica Stein. ....	45
Tabela 5: Questionário preenchido pelo Sr. Mario Sossela Filho, constando de resultados da unidade Fazenda Iguaçu – Star Milk. ....	48
Tabela 6: Resultados de aplicação do formulário para as unidades visitadas. ....	49

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

- ABCS – Associação Brasileira dos Criadores de Suínos.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo e Biocombustíveis.
- ART – Anotação de Responsabilidade Técnica.
- CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.
- CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis com ênfase no Biogás.
- COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social.
- CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária, Ministério da Economia.
- Copel – Companhia Paranaense de Energia Elétrica.
- DCI – Descrição das Cargas Instaladas.
- DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.
- DIEESE – Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos.
- EPE – Empresa Brasileira de Pesquisa Energética.
- FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.
- FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos.
- FNR – *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe* do alemão Agência de Recursos Renováveis.
- FPTI – Fundação Parque Tecnológico Itaipu.
- GD – Geração Distribuída.
- GI – Geração Isolada.
- GMG – Grupo Moto Gerador.
- ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.
- LV/BM – Linha Viva/Barra Morta.
- MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento.
- NTC – Norma Técnica Copel.
- PCI – Poder Calorífico Inferior.
- PCS – Poder Calorífico Superior.
- PIS – Programa de Integração Social.
- PNE – Plano Nacional de Energia.

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica.

PPGTGS – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Gestão e Sustentabilidade.

PPS – Painel de Proteção e Seccionamento.

RN – Resolução Normativa.

SWOT – *Strengths* (Forças), *Weaknesses* (Fraquezas), *Opportunities* (Oportunidades) e *Threats*(Ameaças).

UD – Unidade de Demonstração.

UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

# 1. INTRODUÇÃO

Aos 17 (dezessete) anos e no início dos anos 2000, quando decidia parte de meu futuro, na escolha do curso superior para o qual prestaria meu vestibular, as opções em Foz do Iguaçu ainda eram restritas. Dentre as opções, a eleita foi a Engenharia Elétrica, pela falta da Engenharia Mecânica e pelo fato do irmão mais velho já estar no mesmo curso e ter a possibilidade de aproveitar o material didático já adquirido para ele.

Veio o vestibular e obtive o sucesso necessário, tendo a oportunidade de cursar engenharia em uma instituição pública, a UNIOESTE, iniciei a graduação em 2001. Durante a minha graduação e do meu irmão, nossa família passou por dificuldades financeiras, e tive a oportunidade de um emprego de eletricista de distribuição na concessionária de energia elétrica do Estado do Paraná, Copel Distribuição S.A. Para tal, deixei minhas atividades acadêmicas durante o 3º ano da graduação, e durante os 4 (quatro) anos seguintes cursei somente algumas disciplinas em que havia horários compatíveis com as atividades laborais, esposa e filha recém chegada (fev/2005).

Retornei de forma regular para a graduação em 2007, conciliando formação acadêmica, família e trabalho. Conclui a graduação em 2010, recebendo o grau de Engenheiro Eletricista com ênfase em sistemas de potência, em fevereiro de 2011.

Após 8 (oito) anos e meio como funcionário concursado da Copel Distribuição S.A. e já com 1 (um) ano passado de formado e não exercendo a minha profissão, tive a oportunidade de participar de um processo seletivo para o posto de Engenheiro Eletricista na Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI).

Em março de 2012, abdiquei de meu posto na Copel por um contrato de 6 (seis) meses na FPTI, onde iniciei meu contato com projetos de geração de energia elétrica que utilizam o biogás como fonte combustível. Desde então se passaram 7 (sete) anos e meio, há 5 (cinco) trabalho no Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás).

Neste período, muito foi realizado em relação ao desenvolvimento do conhecimento associado à geração de energia elétrica com biogás. Sendo o biogás um combustível oriundo do processo de digestão anaeróbia de matéria orgânica, e que possui características que favorecem seu uso como combustível (CIBIOGÁS, 2018).

O desenvolvimento de soluções na região Oeste do Paraná, bem como atuação com empresas de grande porte do ramo de energias renováveis, permitiu a implantação de diversos projetos definidos como Unidades de Demonstração (UD's) de forma regional, bem como a prestação de serviços de consultoria a nível nacional e internacional favoreceu o desenvolvimento de pensamento crítico sobre o uso do biogás como combustível para geração de energia elétrica. Pensando na consolidação de tais conhecimentos e na contribuição deste para a nossa região, tomei a decisão de iniciar a pós-graduação *stricto sensu* em 2017, como aluno especial.

Considerando a contribuição que a primeira disciplina, qualidade aplicada ao desenvolvimento de tecnologias, trouxe à minha formação profissional e que o resultado desta pode trazer para a nossa região, que possui vocação agropecuária, com grande potencial para uso do biogás como energia, tomei a decisão de pesquisar mais sobre o tema como aluno regular do Programa de Pós Graduação em Tecnologias, Gestão e Sustentabilidade (PPGTGS), iniciando as atividades como aluno regular em 2018.

A suinocultura no Brasil vem crescendo vigorosamente nas últimas décadas, impulsionada pelos investimentos em ampliações dos plantéis e pela evolução na produtividade das granjas. O plantel reprodutivo brasileiro é de 1.720.255 (Um milhão, setecentos e vinte mil e duzentos e cinquenta e cinco) matrizes, tendo produzido 39.263.964 (Trinta e nove milhões, duzentos e sessenta e três mil e novecentos e sessenta e quatro) suínos para abate em 2015. Toda esta produção fez com que o Produto Interno Bruto da suinocultura no Brasil somasse 62,576 bilhões no fechamento de 2015 (ABCS, 2016).

Atualmente, os 03 (três) Estados do Sul do Brasil detém a maior parte da produção de suínos do país<sup>1</sup>. A região possui cerca de 60% das granjas de matrizes com até 500 (Quinhentas) reprodutoras, 96% das granjas de terminação, 95% dos crechários e 56% das granjas de ciclo completo vinculadas a agroindústrias ou cooperativas. Dentro desta segmentação, o Paraná está com 264.371 (Duzentos e sessenta e quatro mil, trezentas e setenta e um) matrizes, correspondendo a 15,6% do total nacional (ABCS, 2016).

Esse crescimento do setor desperta maior preocupação com a produção sustentável de carne suína com destaque aos aspectos de gestão racional do uso de recursos e de tratamento

---

<sup>1</sup> A região Sul, com destaque ao Oeste do Paraná, também possui um vasto plantel de aves de corte, contudo, as tecnologias atuais para produção de biogás com este resíduo ainda possuem um desafio quanto à sua viabilidade econômica, contudo, o método proposto pode ser aplicado a geração de energia elétrica sem distinção da fonte de produção do biogás.

dos resíduos. Nestes sistemas, o uso indiscriminado de água, pode diluir excessivamente a biomassa residual, gerando dificuldades no seu tratamento, além de aumento de gastos para o transporte e utilização como fertilizante e maior uso dos recursos hídricos (MAPA, 2016).

A biomassa gerada nestes processos produtivos pode ser tratada a partir da digestão anaeróbia, em que a matéria orgânica é degradada por microrganismos anaeróbios (bactérias), resultando em produtos como: o biogás e o biofertilizante.

O biogás é uma fonte de energia renovável promissora, tendo o metano (CH<sub>4</sub>) como seu principal componente. Este pode ser purificado para produzir combustível de alta qualidade (biometano) sendo uma fonte alternativa para a atualidade. A procura do biogás deverá aumentar continuamente nos próximos anos, devido a sua capacidade de produzir menores emissões de CO<sub>2</sub> do que combustíveis fósseis (CHAEMCHUEN et al., 2013).

Considerando o contexto nacional e regional quanto a importância do setor agropecuário, o aproveitamento do biogás para suprir demandas energéticas do agronegócio tem se tornado uma realidade. Esta modalidade de projetos de energias renováveis tem apresentado resultados satisfatórios na questão econômica, técnica e ambiental, além de receber reconhecimento legal e regulatório pelos agentes do setor energético (ANEEL, 2012; ANP, 2015).

O monitoramento dos projetos de biogás para energia elétrica realizado pelo CIBiogás e anteriormente pela FPTI, considera a obtenção de dados operacionais e avaliação de indicadores que norteiam a operação e desempenho das unidades. Neste contexto, são aplicados critérios de análise quantitativa das informações para tomada de decisão, baseada nos dados obtidos, na experiência da equipe e dados pesquisados na literatura existente para o assunto.

Com a evolução dos projetos, de unidades de demonstração para unidades de negócio, com investimento exclusivo e efetivo dos proprietários, identifica-se uma lacuna de análise qualitativa do universo de unidades monitoradas, como forma de identificar o “valor” entregue ao cliente de cada unidade, bem como, o atendimento das expectativas sobre o projeto de biogás como um todo.

Dentre as perguntas que surgiram neste processo, escolhemos como norteadoras as seguintes questões:

- Por que projetos tecnicamente similares possuem resultados econômicos e de satisfação do cliente divergentes?
- Como dimensionar o sistema para geração de energia elétrica com biogás, da forma adequada a cada realidade e condições ambientais encontradas nas diversas regiões e condições ambientais do Brasil?

A metodologia proposta prevê o uso combinado do Diagrama de Ishikawa e da Matriz SWOT na forma reduzida para apoio a tomada de decisão por meio de uma abordagem qualitativa. Tal proposta será validada pela aplicação em 03 (três) unidades monitoradas com sistema de geração de energia elétrica à biogás, com foco ao efeito ou objeto de atendimento da expectativa do cliente e as causas técnicas e econômicas relacionadas com satisfação.

Neste sentido o objetivo desta pesquisa é “Construir um método de apoio a tomada de decisão sobre a configuração de arranjos técnicos e econômicos em projetos de geração de energia elétrica com biogás, considerando variáveis qualitativas referentes ao ambiente em que a unidade está ou será inserida”.

No cumprimento dos objetivos espera-se contribuir em diferentes esferas, como:

- Social: A evolução em número de projetos viabiliza toda uma cadeia produtiva relacionada com os projetos de biogás, criando novas oportunidades de empregos e renda;
- Educacional: A apresentação de uma ferramenta de análise qualitativa para apoio a tomada de decisão em projetos de biogás para energia elétrica, favorece o desenvolvimento dos conceitos para construção de arranjos técnicos e econômicos tanto em cursos técnicos como graduações e pós-graduações.
- Tecnológica: A classificação e identificação de gargalos técnicos e econômicos recorrentes, auxilia no direcionamento dos esforços para novas pesquisas de forma mais assertiva;
- Econômica: O ganho de tempo para elaboração de arranjos e conseqüente redução dos custos de elaboração de projetos, afetam os custos ao cliente final, favorecendo a empresa e o mercado relacionado;
- Sanitária: A viabilização de novos projetos de biogás, estimula o tratamento dos resíduos e redução de emissões em diversos segmentos, como: agropecuário e resíduos sólidos urbanos;

- Cultural: Com a popularização de projetos de biogás ocorre a popularização do conceito de sustentabilidade, onde é previsto o saneamento ambiental com resultados sociais e econômicos, por meio da transformação de passivos ambientais e ativos energéticos;
- Profissional: Com a implementação de tal método, pretende-se sistematizar a elaboração de projetos para geração de energia elétrica com biogás, e dessa forma, prover à categoria uma ferramenta para diagnóstico e orientação à construção de modelos e arranjos tecnológicos;
- Legal: A evolução dos projetos, visto que gargalos técnicos e econômicos serão identificados, permitirá a identificação de gargalos legais, subsidiando propostas que favoreçam a evolução do marco legal do biogás e da geração distribuída.

A dissertação está estruturada de forma a primeiramente familiarizar o leitor com os termos e o tema de geração de energia elétrica com biogás. Serão apresentados formatos de arranjos tecnológicos usuais e tecnologias empregadas para as implementações.

Serão fundamentadas as características do biogás, bem como a interferência destas características sobre o processo de geração de energia elétrica, dando foco para o rendimento das unidades geradoras. Ainda será apresentado, de forma breve, o marco regulatório brasileiro, que regulamenta a atividade e conexão com o sistema elétrico brasileiro.

Na sessão seguinte, será apresentada a metodologia de análise qualitativa adotada para o desenvolvimento do método. Serão abordadas as metodologias do Diagrama de Ishikawa, ou diagrama de causa e efeito, e, Matriz SWOT reduzida, com função de classificar as causas entre ambientes interno e/ou externo.

Com estas metodologias pretende-se realizar análise completa sobre a primeira unidade de demonstração, Fazenda Iguazu – Starmilk, descrito no item 4.1 desta dissertação. Com estes resultados pretende-se elaborar a primeira versão do método, permitindo então a sua aplicação em outras UD's, de forma a ajustar a metodologia com a análise dos resultados obtidos. A apresentação dos resultados, bem como suas análises serão apresentados na penúltima sessão, sendo seguidos da conclusão e da bibliografia utilizada.

## 2. CONCEITUAÇÃO TEÓRICA SOBRE BIOGÁS

Nesta sessão serão apresentados os termos e conceitos que regem e norteiam projetos de biogás, como forma de familiarizar o leitor com o tema e facilitar o entendimento das análises e hipóteses apresentadas.

### 2.1. Arranjos tecnológicos com biogás

CIBiogás (2018) apresenta alguns dos arranjos tecnológicos com biogás, Figura 1.

Figura 1: Ilustração das rotas tecnológicas para produção e uso do biogás.



Fonte: CIBiogás, 2018.

A rota tecnológica da produção ao uso energético do biogás e todos os produtos e serviços da cadeia de valor do biogás podem ser visualizados na Figura 1. Dentre as etapas consideradas, a primeira consiste na análise da matéria prima, para então definir a tecnologia mais adequada para pré-tratamento, biodigestão e refino do biogás. Com estas definições, a escolha do uso do biogás requer uma avaliação técnica e econômica para realização dos investimentos, bem como para identificar sua viabilidade.

Verifica-se dessa forma a complexidade atribuída à implantação correta e viável de projetos para uso energético do biogás, bem como a necessidade de conhecimento técnico especializado nos diversos níveis de envolvimento com a implantação de uma unidade.

## **2.2. Características do biogás**

As características físicas do biogás variam em acordo com a variação de sua composição química, a relação entre seus principais gases, Metano ( $\text{CH}_4$ ) e Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), que por meio das informações contidas na ABNT NBR 15.213 (2008) apresenta informações suficientes para comprovar essa afirmação.

Normalmente a composição do biogás é afetada por alterações do meio em que é produzido o biogás, podendo ser de ordem operacional, por alterações de manejo, ou mesmo pelo tipo de matéria orgânica que está sendo degradada para produzi-lo. Não é comum utilizar aparatos ou equipamentos e produtos para controlar todos os processos ou variáveis relacionados com a produção de biogás, tampouco para padronizar as características do biogás produzido, para que este seja igual em todas as unidades. Isto não é realizado por uma questão técnica, regulatória e principalmente econômica.

Neste contexto, conhecer as características básicas do biogás é crucial para o correto dimensionamento de equipamentos para armazenamento, transporte, compressão e uso energético. Dentre as principais características podemos citar:

- **Densidade:** Alterações da relação entre volume e massa no biogás, afetam o dimensionamento físico e rendimento de compressores, tubulações, sistemas de armazenamento, além da capacidade operacional de unidades geradoras ou queimadores à biogás. Em situações extremas pode afetar o planejamento de segurança para atmosferas potencialmente explosivas, visto o gás estar depositado em pontos baixos ou altos em acordo com a densidade;

- Poder calorífico e Índice Wobbe: Propriedade que relaciona a quantidade de energia liberada por unidade de massa ou volume de um combustível, afeta a capacidade operacional de equipamentos de queima do biogás, como queimadores industriais e motores à combustão. O índice de Wobbe inclusive é utilizado para indicar a interoperabilidade de equipamentos com diferentes combustíveis;
- Fator de compressibilidade: Propriedade que relaciona o volume real de gás para dadas condições de temperatura e pressão. Gases combustíveis com mesmo fator de compressibilidade possuem interoperabilidade de equipamentos relacionados com a compressão, transporte e armazenamento;

As características do biogás, podem ser verificadas e entendidas de forma abrangente no APÊNDICE 1 e 2, no qual são apresentadas a Nota Técnica nº 002/2018 (CIBIOGÁS, 2018) com as características gerais do biogás e no APÊNDICE 2, o artigo em fase de publicação, que retoma as características e indica sua intercambialidade com o gás natural (ZANK; SCHMOELLER-BRANDT; BEZERRA; PEREIRA, no prelo).

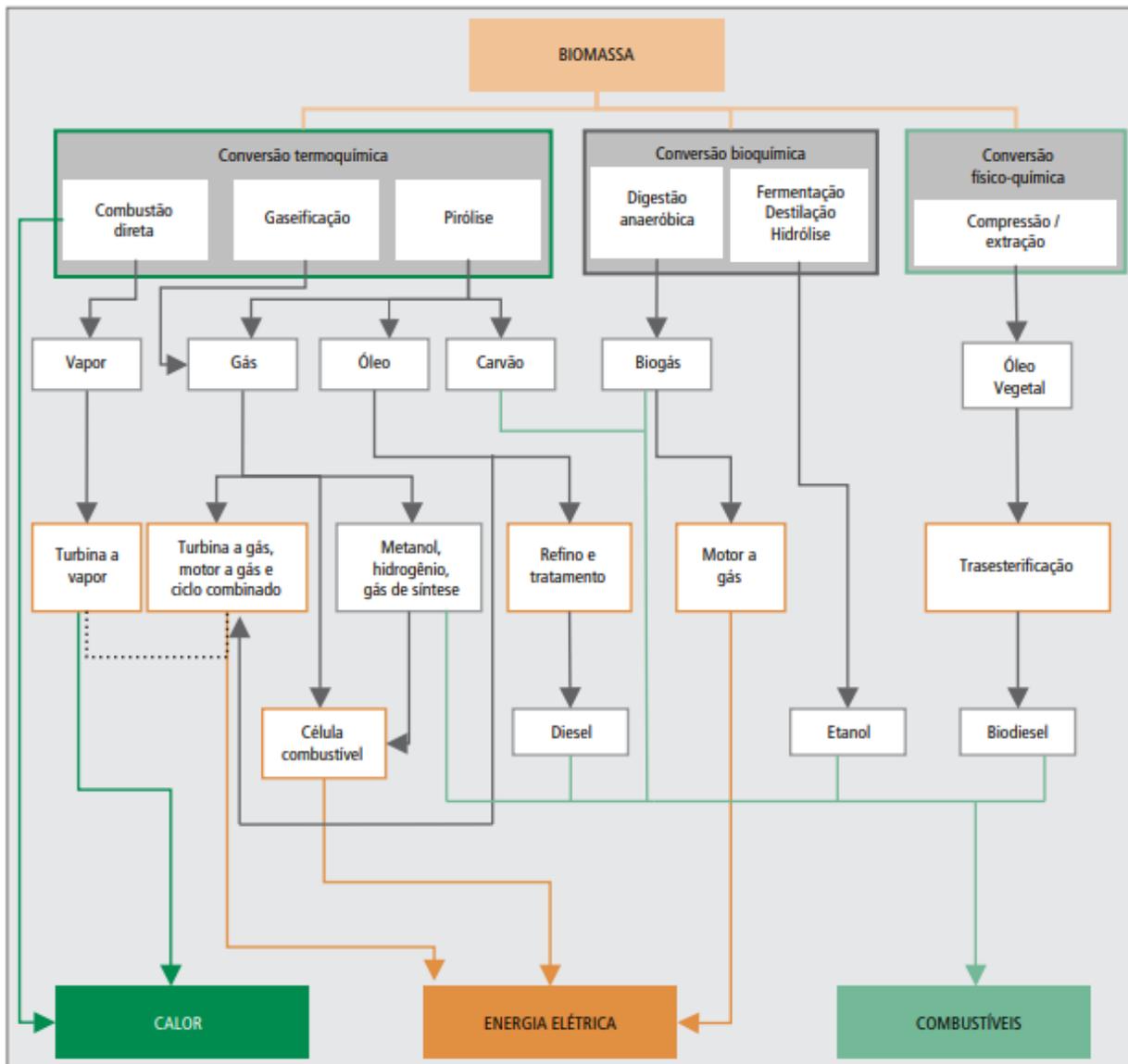
### **2.3. Conversão de biogás em energia elétrica**

As rotas tecnológicas para conversão da biomassa em energia elétrica apresentadas pela EPE no PNE 2030 (Figura 2), consideram 03 (três) tipos básicos de conversão, que são: termoquímica, bioquímica e físico-química. O biogás faz parte da rota de conversão bioquímica, por meio da digestão anaeróbica.

Ainda considerando as rotas apresentadas pela EPE (2017), o biogás pode ser utilizado em motores a gás para geração energia elétrica e como biocombustível. Para os distintos usos do biogás, sendo este comparado com uma matéria prima energética como o petróleo, são necessários diferentes rotas tecnológicas para preparar tratamento anterior ao uso.

A pesquisa realizada possui foco na geração de energia elétrica com biogás, e nessa seção, sobre a influência da eficiência de conversão deste em energia elétrica sobre, a viabilização de projetos, escolha dos arranjos tecnológicos mais adequados e que realmente sejam a melhor decisão para o cliente ou investidor e ainda sobre o melhor resultado ambiental, visto que a viabilização do uso de geradores, viabiliza o sistema de tratamento de resíduos ou efluentes.

Figura 2: Rotas tecnológicas para conversão de biomassa em energia elétrica.



Fonte: EPE, 2017.

Na produção de energia elétrica a eficiência do Grupo Motor Gerador (GMG) é fundamental para a viabilização dos projetos, principalmente quando o combustível utilizado para alimentação é o biogás. Segundo a *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe*, do alemão Agência de Recursos Renováveis, E. V. (FNR, 2010), citado no Guia Prático do Biogás, na maioria dos casos os motores utilizados são de combustão acoplados a um gerador. Estes motores operam a uma rotação constante transmitida ao gerador de forma que este possa fornecer energia elétrica compatível com a frequência da rede. Existem outras opções de motores para acionar o gerador, que são menos frequentes, como microturbinas a gás, motores

Stirling ou células de combustível como alternativas aos motores do ciclo Diesel (ignição por compressão) ou ciclo Otto (ignição por centelha).

Dos motores de combustão interna, são utilizados motores com ciclo Otto ou Diesel. Sendo comum também, encontrar motores de ciclo diesel adaptados ao ciclo Otto para a utilização com biogás. Assim, esses motores funcionam sem óleo de ignição conforme o princípio do ciclo Otto, sendo que a principal diferença na forma é a introdução de um misturador na entrada do ar, antes da etapa de compressão.

## **2.4. Eficiência dos geradores**

Eficiência de conversão energética é definida por Çengel e Boles (2008) como o resultado desejado dividido pelo fornecimento necessário de energia. De forma geral, em equipamentos que envolvem queima de combustível, a eficiência envolve o poder calorífico do combustível, que é definido como: “[...] quantidade unitária de combustível à temperatura ambiente que é completamente queimada e os produtos da combustão são resfriados até a temperatura ambiente”, ainda segundo Çengel e Boles (2008, p. 79).

O poder calorífico dos combustíveis pode se apresentar diferente conforme a água gerada do produto da combustão estar no estado líquido ou vapor. Quando a água for liberada na forma de vapor é o poder calorífico inferior (PCI), já quando a água dos gases de combustão é completamente condensada e, assim, o calor da vaporização é recuperado também, é o poder calorífico superior (PCS). Estes termos devem ser sempre definidos e apresentados nos cálculos da eficiência das usinas de potência, pois têm efeitos diretos nos resultados (ÇENGEL E BOLES, 2008).

Entre os motores de combustão interna os mais comuns são os de ciclo Diesel e Otto. Segundo Çengel e Boles (2013), as eficiências térmicas para motores de ciclo Diesel variam entre 35 e 40% e os motores de ciclo Otto ou ignição por centelha variam de 25% até 30%.

Tratando-se de motores alimentados a biogás, os mais comumente encontrados no mercado são os motores com ciclo Diesel convertidos para o ciclo Otto, pelo processo conhecido como Ottolização, ou motores Otto alimentados a gás natural ajustado para biogás.

Na literatura pode-se encontrar alguns exemplos e experimentos com análise da eficiência de conversão do biogás em energia elétrica. Um experimento testando a eficiência de grupos geradores de energia elétrica adaptados para biogás com potência de 104 kVA

realizado por Souza et al. (2013) calculou uma eficiência de 17,29% com 50% de carga e em carga total a eficiência subiu para 22,21%.

Segundo Brenneisen (2013), para a utilização de biogás em motores que operam em ciclo Otto, não é necessário realizar muitas alterações, isso porque podem operar 100% a gás. Os motores que operam segundo o ciclo Otto, são compostos por quatro tempos: admissão, compressão, expansão e escape. Souza (2006) diz que, durante os quatro tempos, ou duas rotações da árvore de manivelas, transmite-se trabalho do êmbolo uma só vez, a cada ciclo completo. Isso faz com que as válvulas de admissão e escapamento funcionem adequadamente, a árvore de comando de válvulas (ou eixo de cames) gira a meia rotação do motor, completando uma volta a cada ciclo de quatro tempos.

Para a alimentação de motores do ciclo Otto com combustíveis gasosos geralmente é utilizado um carburador tipo Venturi. O aumento de velocidade do fluido que passa pelo Venturi e consequente queda de pressão faz com que o combustível gasoso seja dosado por meio da válvula diafragma reguladora de fluxo e o combustível gasoso é misturado na corrente principal de ar, em uma proporção exigida para a queima da mistura e o correto funcionamento do motor (SOUZA, 2006).

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe E. V. (FNR, 2010, p.128) defende que: “[...] a eficiência de usinas de cogeração operadas com motores a gás do ciclo Otto é de 34% a 42%. Com o aumento da potência elétrica, aumenta a eficiência do motor, seja ele com ignição a compressão ou do ciclo Otto”. Já segundo Pinto (2006), os motores adaptados para metano, sofrem redução de potência da ordem de 10% em relação ao combustível original. Então diante das afirmações anteriores pode-se dizer que a eficiência do motor alimentado por biogás fica em torno de 24 a 34%.

Com objetivo de diminuir as emissões de óxidos de nitrogênio, estes motores são operados como motores de mistura pobre com excesso de ar. O Guia Prático do Biogás (2013) indica que na operação deve-se ter uma mistura pobre, assim, uma quantidade menor de combustível é convertida no motor, o que tem como consequência a queda do seu desempenho, compensada pela ação de turbocompressores. Motores a gás do ciclo Otto geralmente exigem um teor de metano mínimo de 45% no biogás.

Em linhas gerais, a variação no rendimento das máquinas primárias de unidades geradoras afeta tanto o dimensionamento dos equipamentos adjacentes, como painéis de proteção e equipamentos para condicionamento e transporte do biogás, como a viabilidade

econômica dos arranjos implantados, visto que altera a quantidade de energia e receita gerada por unidade de massa ou volume de combustível.

## **2.5. Marco regulatório**

A regulação do setor elétrico possui papel fundamental na viabilização de projetos para geração de energia, independente da fonte ou escala, por meio dela que são indicados os mecanismos técnicos e legais. Conforme as variações do preço ao consumidor final no mercado de energia elétrica entre 2013 e 2016, indicam que em 2015 ocorreram aumentos acumulados em torno de 58% no valor da energia elétrica. Entre as principais causas destes aumentos tem-se: variações nos impostos, acionamento de usinas térmicas ou mesmo os períodos de chuva escassa (DIEESE, 2015). Assim, a possibilidade de gerar energia elétrica no ponto de consumo tornou-se cada vez mais viável e atrativo.

Dentre as opções para geração de energia elétrica, as energias renováveis ganharam destaque ainda em 2012 com a publicação pela ANEEL da Resolução Normativa nº 482 (RN nº 482), que em seu segundo capítulo, artigo 3º, garantiu o acesso à rede de distribuição de todos os sistemas de geração distribuída em micro e mini geração, e conforme capítulo 1, artigo 2º, parágrafo III, implantou o sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012). Os sistemas de geração com fontes renováveis, dando destaque para a energia solar e biomassa (biogás), anteriormente a esta RN necessitavam de chamadas públicas para permitir a compra de energia elétrica, ou operavam de forma isolada,

Com a publicação da RN nº 687 em 2015 e 786/2017, em seu Capítulo 1, artigo 2º, foram ampliadas as possibilidades de implantação de projetos para produção de energia renovável em Geração Distribuída, com o aumento da faixa de potência em mini geração, de 1 MW para 5 MW (ANEEL, 2017), e principalmente no quesito de arranjo técnico e comercial dos projetos, permitindo a implantação em parceria, condomínio ou consórcios, em que ocorre a divisão dos créditos da energia produzida entre os participantes do empreendimento (ANEEL, 2015).

A geração de energia elétrica com aproveitamento do biogás pode ser realizada de forma isolada ou em paralelo com a rede de distribuição. Para os sistemas de geração isolada, mesmo que não haja comunicação com a rede de distribuição local, é necessário o contato com a concessionária para informar a implantação do sistema de geração, visto que todas as concessionárias possuem normas ou procedimentos técnicos que devem ser respeitados e seguidos. Além dos quesitos técnicos sobre a energia elétrica ainda há quesitos de segurança,

ambientais e legais sobre a geração própria. Nas subseções seguintes são apresentadas informações sobre o funcionamento da geração isolada e geração distribuída.

### **2.5.1. Geração isolada (GI – sem paralelismo)**

A geração isolada pode ser realizada com ou sem conexão com a rede de distribuição, neste contexto as normas técnicas e marco regulatório são simplificados. Dentre as indicações normativas, há a comunicação de geração própria e apresentação de projeto para a concessionária. Em casos omissos da concessionária, devido as comunidades ribeirinhas ou isoladas, a recomendação é o registro da geração na ANEEL, o que nem sempre ocorre.

Os sistemas de geração isolada têm, em sua maior proporção, o uso de fontes como diesel ou gás natural para geração de energia elétrica, sendo que há menos representatividade no que se refere a geração com biogás ou de fonte solar. Há diferentes maneiras de realizar a geração isolada em relação às cargas e a concessionária de energia, sendo que os modelos mais comuns são:

- **Geração dedicada** – É utilizada em comunidades isoladas como única fonte de energia elétrica, mas sem conexão com redes maiores. Característica de sistemas de distribuição radiais e em caso de alimentação de carga específica, ao exemplo de estações de bombeamento ou abastecimento de água;
- **Geração em emergência** – A utilização da geração isolada da rede elétrica associada ao atendimento de demanda emergencial tem por objetivo suprir energia em caso de falha no fornecimento de energia elétrica pela concessionária ou a fonte principal;
- **Atendimento de demandas programadas** – Visando reduzir o pico de carga que ocorre no final da tarde e início da noite, as concessionárias de energia elétrica penalizam os consumidores industriais (grupo A), elevando o preço da energia no horário de ponta em relação ao valor cobrado fora do horário de ponta. Este aumento do preço da energia elétrica faz com que se busquem alternativas para minimizar o gasto com o consumo de energia elétrica. Dentre as alternativas a GI para atendimento das demandas é utilizada;
- **Conexão por reversora** – As chaves comutadoras de fonte são construídas de diversas formas e dotadas de recursos que vão desde o tipo faca, contatores, controles eletrônicos digitais, comandos e sinalizações locais e remotas (PIVETA, 2010). Podem ser manuais ou automáticas com acionamento, constituídas por um par de

contatores ou disjuntores motorizados com comandos à distância para abertura e fechamento. A concepção mais simples de chave reversora seria o contato reversível, conhecido como SPDT (Single Pole Double Throw) utilizado nos relés (ASANO, 2015). Todas as concessionárias de energia exigem que as chaves reversoras sejam dotadas de intertravamento mecânico e nas chaves com acionamento elétrico, são utilizados contatos auxiliares para fazer intertravamento elétrico (PEREIRA, 2009). No Estado do Paraná, a Copel Distribuição S.A. adota a NTC 903107 (NTC-Norma Técnica Copel), para regulamentar tecnicamente os padrões de segurança e os requisitos técnicos mínimos para geração própria com operação isolada (COPEL, 2019). Para os casos nos quais ocorrem o paralelismo momentâneo, utiliza-se a NTC 903105, geração própria com paralelismo momentâneo para operação isolada.

Ambas as normas citadas foram elaboradas considerando o disposto nos Procedimentos de Distribuição – PRODIST, que são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica no território nacional.

### **2.5.2. Geração distribuída (GD – paralelismo permanente)**

O Caderno Temático da Agência Nacional de Energia Elétrica – Micro e Minigeração Distribuída - 2ª edição (ANEEL, 2016) caracteriza geração distribuída como sendo a instalação de geradores de pequeno porte a partir de fontes de energias renováveis ou combustíveis fósseis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica. Ou seja, o termo ‘geração distribuída’ engloba a ‘geração isolada’, mesmo que esteja subentendida a conexão quando se utiliza o termo GD, este deve ser esclarecido como paralelismo permanente.

O marco regulatório para a geração distribuída com paralelismo permanente tem como destaque as seguintes leis, decretos e resoluções normativas:

- **Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004** – dispõe sobre a comercialização de energia elétrica mediante contratação regulada ou livre. Essa lei introduziu o conceito de geração distribuída na legislação brasileira e estabeleceu que no edital de licitação para novos empreendimentos de geração de energia elétrica, poderá constar percentual mínimo de energia elétrica a ser destinada ao mercado regulado, podendo a energia remanescente ser destinada ao consumo próprio ou à comercialização para contratação livre.

- **Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004** – regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Esse decreto foi relevante para a GD, pois delineou o mercado a ser atendido por tais geradores.
- **Resolução Normativa nº 77, de 18 de agosto de 2004** – estipulou a redução de 50% a ser aplicado às tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos com potência igual ou inferior a 1.000 kW, para aqueles caracterizados como pequena central hidrelétrica e àqueles com base em fontes solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição fosse menor ou igual a 30.000 kW. Essa redação foi dada posteriormente pela Resolução Normativa nº 271, de 3 de julho de 2007, assegurando o direito a 100% de redução a ser aplicado às tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição pelos empreendimentos que, entre outros, utilizem como insumo energético, no mínimo, 50% de biomassa composta de resíduos sólidos urbanos e/ou de biogás de aterro sanitário ou biodigestores de resíduos vegetais ou animais, assim como lodos de estações de tratamento de esgoto.
- **Resolução Normativa nº 167, de 10 de outubro de 2005** – estabelece as condições para a comercialização de energia proveniente de Geração Distribuída.
- **Resolução Normativa nº 235, de 14 de novembro de 2006** – estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia e dá outras providências.
- **Resolução Normativa nº 247, de 21 de dezembro de 2006** – estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW.
- **Resolução Normativa nº 323, de 8 de julho de 2008** – estabelece os critérios e procedimentos para a informação, registro, aprovação e homologação pela ANEEL dos contratos de comercialização de energia elétrica.
- **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012** – estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.

- **Resolução Normativa no 517, de 11 de dezembro de 2012** – altera a Resolução Normativa no 482, de 17 de abril de 2012, esclarecendo o conceito do sistema de compensação de energia.
- **Convênio ICMS 6 CONFAZ, de 05 de abril de 2013** – determina a apuração do imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e serviços (ICMS) tendo como base de cálculo toda energia que chega à unidade consumidora proveniente da distribuidora.
- **Lei nº 20.824 de Minas Gerais, de 31 de julho de 2013** – isenta a cobrança de ICMS sobre a micro e mini geração distribuída no estado de Minas Gerais, no prazo de cinco anos.
- **Convênio ICMS 16 CONFAZ, de 22 de abril de 2015** – autoriza a concessão de isenção do ICMS incidente sobre a energia elétrica fornecida pela distribuidora à unidade consumidora, atualmente todos os Estados brasileiros aderiram ao Convênio, adesão esta que possui prazo de 4 (quatro) anos e pode ser renovada por mais 4 (quatro) anos.
- **Lei nº 13.169, de 16 de outubro de 2015** – isenta a cobrança dos tributos do Programa de Integração Social (PIS) e a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (Cofins) da micro e minigeração no país.
- **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015** – altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 do PRODIST. Esta resolução normativa adota as seguintes definições:
  - Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW que utiliza cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
  - Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada (sendo 3 MW para a fontes hídricas) ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

- Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.
- Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (condomínios): nessa configuração, a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores.
- Geração compartilhada: diversos interessados podem se unir em um consórcio ou cooperativa, instalar uma microgeração ou minigeração distribuída e utilizar a energia gerada para a redução das faturas dos consorciados ou cooperados.
- Autoconsumo remoto: os créditos de energia podem ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora.
- Para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa, que não pode ser revertido em dinheiro, mas pode ser utilizado para abater o consumo da unidade consumidora nos meses subsequentes ou em outras unidades de mesma titularidade (desde que todas as unidades estejam na mesma área de concessão), com validade de 60 meses.
- **Resolução Normativa no 786, de 17 de outubro de 2017** – altera a Resolução Normativa no 482, de 17 de abril de 2012. Esta resolução normativa veta o enquadramento como microgeração ou minigeração distribuída das centrais geradoras que já tenham sido objeto de registro, concessão, permissão ou autorização, ou tenham entrado em operação comercial ou tenham tido sua energia elétrica contabilizada no âmbito da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) ou comprometida diretamente com concessionária ou permissionária de distribuição de energia elétrica, devendo a distribuidora identificar esses casos. E adota a seguinte definição:
  - Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia

elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

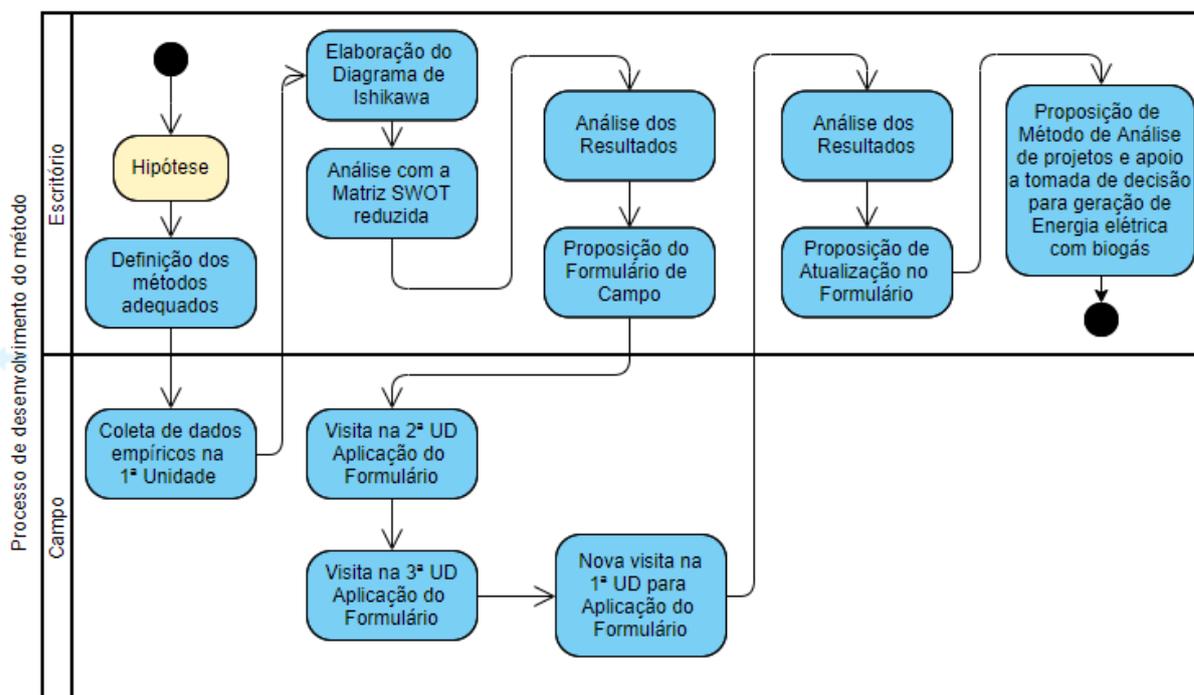
Os aspectos referentes a especificação técnica para conexão com a rede de distribuição, bem como, os procedimentos junto à concessionária não serão abordados neste momento. Na sessão seguinte serão abordadas as metodologias de análise para o desenvolvimento da pesquisa.

### 3. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Na apresentação das metodologias propostas para análise, pretende-se justificar a escolha devido a sua relação com o espaço amostral de uma unidade de demonstração (UD). Com a aplicação das metodologias na primeira unidade, pretende-se elencar causas para efeitos adversos aos resultados e analisar a influência do cenário sobre as falhas.

Dentre os objetivos em contextualizar os resultados diante do cenário analisado, está alocar as lições aprendidas no formato de perguntas com respostas ponderadas em um questionário de avaliação e apoio à tomada de decisão. Após a construção e proposição do questionário, será realizada a aplicação deste na unidade analisada, e em etapa seguinte para mais duas unidades. A análise dos resultados será organizada ao final da pesquisa em campo. O fluxograma deste processo pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3: Imagem ilustrativa do processo metodológico seguido.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha das unidades de demonstração para compor o espaço amostral da pesquisa considera os diferentes formatos preconizados para geração de energia elétrica com biogás. Sendo estes relacionados com a escala, micro e minigeração, e com o arranjo tecnológico envolvido, geração isolada ou em paralelismo permanente.

Durante a escolha das unidades preconizou-se a diversidade destes pontos, sendo escolhidas 3 (três) unidades. A primeira unidade consiste em uma minigeração que operou de forma isolada pelo período de um ano e foi conectada em paralelismo permanente em fevereiro de 2019, que é a Fazenda Iguazu – Star Milk, de Céu Azul/PR. A segunda unidade foi uma das primeiras a gerar energia elétrica com biogás em paralelismo permanente no Brasil, estando conectada como microgeração distribuída há quase 10 (dez) anos, que é a Granja São Pedro – Colombari, instalada em São Miguel do Iguazu/PR. A terceira unidade, opera de forma isolada com microgeração de energia elétrica a partir do biogás para atendimento de demandas internas, sendo essa instalada em Entre Rios do Oeste/PR, a Cerâmica Stein do Sr. Romário Schaefer.

Quanto aos métodos escolhidos, considerando o espaço amostral de 3 (três) unidades de demonstração com geração de energia elétrica a partir do biogás, permitindo uma análise abrangente com diferentes características técnicas e econômicas, fez-se opção por métodos qualitativos. A escolha do Diagrama de Ishikawa, que enfatiza a análise das causas para um efeito, e da matriz SWOT reduzida, que favorece a análise estratégica quanto à origem das causas, bem como a elaboração de um produto que será um questionário para balizar as decisões sobre o arranjo técnico e econômico a ser implantado ou adequado para a unidade.

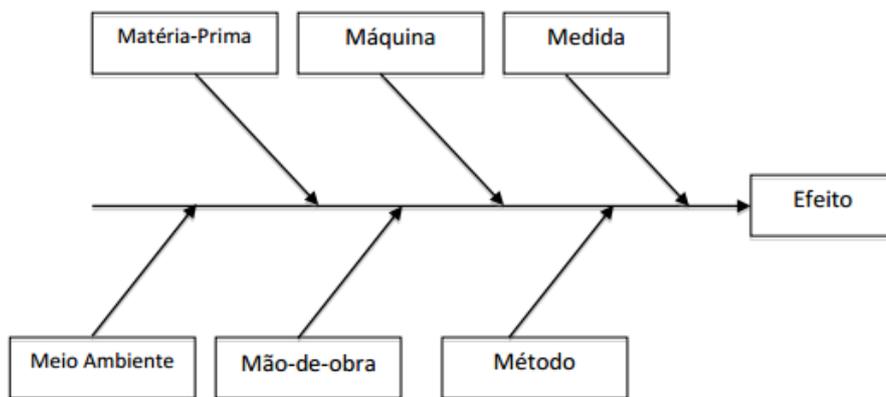
### **3.1. Diagrama de Ishikawa para análise de falhas**

Segundo Campos (1992), o diagrama de Ishikawa pode ser entendido como uma representação de processos ou sub-processos; o efeito do processo ou sub-processo é provocado pelas causas, que são por sua vez classificadas dentro de famílias de causas. A busca pela causa raiz é orientada dentro de 6 (seis) famílias de causas (6M's), como em um brainstorming orientado. O diagrama de Ishikawa organiza um conjunto de causas relacionadas a um efeito específico que se deseja estudar, uma vez que sempre que um efeito (fim, resultado) ocorre, há um conjunto de causas (meios) que podem ter influenciado. O autor ainda relata que este diagrama foi criado para que todos os envolvidos pudessem praticar a separação dos fins e de seus meios.

O diagrama inicia-se considerando o efeito, localizado à direita na Figura 4, este efeito pode ser um problema relacionado à qualidade, uma situação desejada, ou qualquer condição descrita claramente. Segundo Campos (1992) e Ishikawa (1993), as palavras que aparecem nas pontas das ramificações do diagrama são as famílias de causas, que podem ser classificadas como matéria-prima, máquina, medidas, meio ambiente, mão-de-obra e método

– os chamados 6Ms; Campos (1992) ainda os classifica como fatores de manufatura (em se tratando da análise de processo de uma manufatura). O uso da categorização utilizando os 6Ms é comum, mesmo que em alguns casos nem todos os 6Ms sejam utilizados.

Figura 4: Modelo do diagrama de Ishikawa, espinha de peixe ou 6Ms.



Fonte: Adaptado de Campos, 1992.

Construído no formato de uma espinha de peixe, sendo a primeira etapa traçar um eixo horizontal e ao seu final no lado direito, em um retângulo, escrever o efeito ou defeito da forma mais sucinta possível. As causas primárias podem ser elencadas de forma adjacente a este eixo, buscando o formato de uma espinha de peixe. As famílias de causa são: Máquina, Método, Mão de obra, Meio ambiente, Material e Medida.

### 3.2. Análise SWOT reduzida para identificação de cenários

A Análise S.W.O.T. também denominada análise F.O.F.A. em português, é uma ferramenta estrutural da administração, utilizada na análise do ambiente interno e externo, com a finalidade de formulação de estratégias para empresas ou descrição de um cenário. É uma sigla do idioma inglês, na qual representa: Forças (*Strengths*), Oportunidades (*Opportunities*), Fraquezas (*Weaknesses*) e Ameaças (*Threats*), sendo fundamentada por dois professores da Harvard Business School: Kenneth Andrews e Roland Christensen, por volta dos anos 1960 a 1970 (PÚBLIO, 2008), com o objetivo de focar na combinação das forças e fraquezas de uma organização, ao mesmo tempo também nas oportunidades e ameaças do mercado.

Por outro lado, Tarapanof (2001) indica que a ideia da análise SWOT já era utilizada há mais de três mil anos quando cita em uma epígrafe um conselho de Sun Tzu: "Concentre-se nos pontos fortes, reconheça as fraquezas, agarre as oportunidades e proteja-se contra as

ameaças " (SUN TZU, 500 a.C.). Apesar de bastante divulgada e citada por autores, é difícil encontrar uma literatura que aborde diretamente esse tema.

A metodologia é versátil e neste caso será adaptada para análise dos pontos fortes e fracos de um projeto, bem como para análise das ameaças e oportunidades do ambiente externo ao projeto implantado. As forças e fraquezas são avaliadas pela observação da situação atual do projeto inserido no cenário, em geral com relação a fatores internos para problemas que podem ser resolvidos com adequação do projeto e fatores externos, que dependem de atuação com outras instituições como órgão regulador, concessionária, órgão ambiental ou mesmo problemas legais e culturais.

Os pontos fracos pela construção de um projeto, em seus recursos humanos incluem os recursos por: experiência, capacidade, conhecimentos e habilidades. Já os recursos organizacionais são sistemas e processos da empresa como: estratégias, estrutura, cultura. Os recursos físicos são as instalações, equipamentos, tecnologia, canais e outros.

As oportunidades e ameaças estão intimamente ligadas a fatores externos. Esta análise deve ser confeccionada e interpretada de forma a unir as peças-chaves, que são os elementos da análise interna e externa, porque vão formar o diagnóstico e este deve ser confiável e com suporte de uma boa fonte de informação. A organização gráfica da análise SWOT pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5: Representação gráfica da análise SWOT.



Fonte: Adaptado de Tavares, 2010.

Desta forma, ou a equipe interessada no projeto, ou a organização que realizará o investimento, poderão identificar os pontos fortes que ainda não foram utilizados e os pontos fracos que podem ser corrigidos. Diante do conhecimento dos pontos fortes ou fracos e das oportunidades e ameaças, pode-se adotar estratégias que visem buscar direcionamento, correção e/ou melhoria.

Para a análise proposta, a simples identificação entre ambiente interno (força ou fraqueza) e externo (oportunidade ou ameaça) é suficiente. O uso da Matriz SWOT neste formato é aqui definido como uma matriz SWOT reduzida. Onde o formato de apresentação dos resultados da análise será representado por uma tabela de duas colunas, com as causas apresentadas como de ambiente interno ou externo, este formato pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 : Ilustração do formato proposto para a matriz SWOT reduzida.

<b>Ambiente Internos</b>	<b>Ambiente Externo</b>
Fraqueza 1	Ameaça 1
Fraqueza 2	Oportunidade 1
Força 1	Oportunidade 2

Fonte: Elaborado pelo autor.

No próximo capítulo apresentaremos o processo de coleta de dados e de construção do método de análise e avaliação. Serão apresentadas as 3 (três) unidades e os resultados de aplicação do método proposto.

## **4. DESENVOLVIMENTO**

Neste capítulo serão apresentadas as ações para coleta/produção de dados. As informações, dados e análises são apresentados por unidade, sendo que as sessões deste capítulo serão sobre as diferentes UD's.

A aplicação das metodologias foi realizada em sequência, primeiro o diagrama de Ishikawa, determinando as causas para o efeito “projeto não atende a expectativa do cliente”. Com os resultados da aplicação realizou-se a classificação das causas e sub-causas em conformidade à metodologia apresentada para a matriz SWOT reduzida. Com a separação destes itens, buscamos entender e conceituar cada causa, de forma que fosse possível propor uma análise de prioridade para avaliação do projeto e auxílio na tomada de decisão.

Organizamos as causas e informações correlatas no formato de um questionário com respostas pré-determinadas e de valor ponderado, de forma a facilitar o processo de análise e apoio à tomada de decisão. Todas as atividades serão realizadas em conformidade à Figura 3.

### **4.1. Unidade 1 – Fazenda Iguaçu – STAR MILK**

A primeira unidade de demonstração produtora de biogás e geradora de energia elétrica é uma leiteria. A Fazenda Iguaçu – Star Milk, participa da base de projetos de energias renováveis da Itaipu Binacional desde 2011. A unidade conta com um plantel de 1.100 (mil e cem) vacas leiteiras, sendo 600 (seiscentas) lactantes. A produção diária de leite está entre 15 (quinze) e 20 (vinte) mil litros de leite, ao passo que a produção de dejetos animal alcança diariamente um montante de 200 (duzentos) m<sup>3</sup>, considerando a água utilizada na limpeza das instalações.

Com o tratamento dos dejetos de forma anaeróbica ocorre a produção de biogás, e este é conduzido por meio de tubulações em PVC para uma unidade geradora do tipo motor gerador a biogás com potência instalada de 330 kVA. A unidade geradora possui equipamentos para ser conectada em paralelismo permanente com o sistema de distribuição da concessionária.

O Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás (CIBiogás) atua no auxílio técnico da unidade, com análises laboratoriais da biomassa encaminhada ao biodigestor e pareceres técnicos nas diversas áreas de atuação da engenharia que possuem relação com as atividades de produção de biogás e geração de energia elétrica. Os pareceres técnicos

encaminhados pelo CIBiogás não implicam em assunção de responsabilidades sobre as decisões tomadas na unidade.

Em fevereiro de 2017 a unidade implantou o sistema de geração distribuída (GD), que permite a conexão com o sistema de distribuição em paralelismo permanente e enquadrando-se no sistema de compensação conforme a Resolução Normativa nº 482/2012 e nº 687/2015 (ANEEL). Sendo que após a implementação o responsável pela unidade apresenta descontentamento com os resultados e alega que há muitas falhas no sistema implantado.

Considerando o contexto apresentado, a escolha da metodologia deve levar em conta que a unidade não possui informação sobre com que frequência as falhas que causam o descontentamento ocorrem, logo o método deve considerar as informações dos pareceres encaminhados, as reclamações do cliente e os pareceres dos fornecedores de equipamentos e serviços. Considerando a quantidade de documentos envolvidos e base de dados esparsa, as metodologias de análise escolhidas foram qualitativas, o diagrama de Ishikawa e análise SWOT reduzida.

#### **4.1.1. Aplicação do Diagrama de Ishikawa para a Unidade 1**

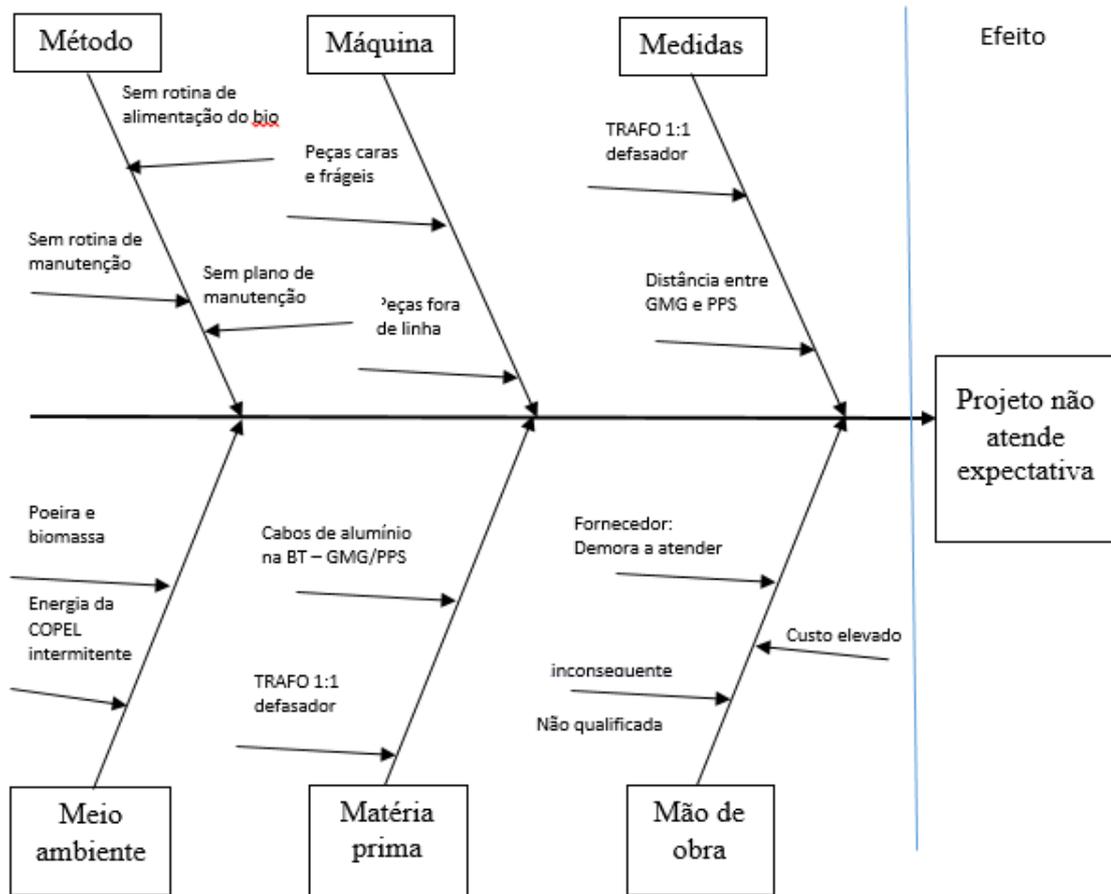
Considerando os 6Ms, discutir-se-á as sub-causas de cada 'M', de forma a construir uma lista de informações para construir o diagrama. Para preencher a lista foram utilizadas informações obtidas em reuniões com o cliente, pareceres técnicos do CIBiogás ao cliente e/ou fornecedores, informações dos fornecedores que possuem interface com o cliente, dentre fornecedores de filtros, biodigestores, equipamentos para pré-tratamento da biomassa, painéis de proteção e unidades geradoras à biogás. A primeira visita foi realizada ainda em 2018, tendo como efeito considerado: 'Projeto não atende a expectativa (cliente)', da pesquisa realizada foram elencadas as seguintes causas e sub-causas para o efeito em questão:

- **Máquina** – Unidade geradora posicionada distante dos centros de carga em mais de 300 metros, instalação da unidade geradora com Trafo de isolamento galvânica (exigido em norma) defasa o ângulo de fase no despacho para uma geração fora do fator de potência unitário. Fornecedor da solução de geração distante em mais 400 km do empreendimento implantado;
- **Medidas** – Rede de baixa tensão entre unidade geradora e cargas está subdimensionada, que causa diferença de tensão entre o ponto de geração e o ponto de medição da proteção e conseqüente limitação do despacho de energia elétrica devido a interrupções indevidas por sub e sobretensão;

- **Mão de obra – Local:** Não tem qualificação específica na área elétrica ou mecânica, muda parâmetros de geração sem consultar especialista; Fornecedor do gerador com custo de manutenção elevadíssimo para deslocamento, fornecedor do gerador distante em mais de 400 km do local;
- **Meio ambiente** – Queima de equipamentos devido falta de para raios, ambiente sujo e com material particulado que causa redução da capacidade de troca térmica do radiador, sobreaquecendo o sistema de geração e reduzindo sua eficiência; Intermitência no fornecimento da energia da rede da concessionária que causa desligamentos frequentes do gerador por atuação do sistema de proteção e consequente fervura do líquido refrigerante do sistema devido às paradas de emergência não programadas;
- **Materiais** – Canos de PVC utilizados para transporte de biogás não possuem estanqueidade suficiente e causam vazamentos de gás e entradas de ar na tubulação de biogás para alimentação da unidade geradora, afetando a qualidade do combustível; Cabos de alumínio com 300 metros de comprimento entre geração e sistema de proteção e sincronismo causam queda de tensão no trecho, limitando despacho; Trafo de isolamento galvânica que foi exigência da concessionária;
- **Método** – Manutenção somente corretiva, pois não há monitoramento remoto das informações da unidade geradora, tendo como consequência longas paradas por peças defeituosas e dificuldades logísticas para reposição; Não tem estabilidade na operação pela variação da qualidade do biogás, que por sua vez é causada por uma alimentação inadequada do biodigestor, devido diluição da biomassa ou mesmo o uso de biomassas não testadas ou adequadas para o sistema de biodigestão existente.

Na Figura 7, ilustra-se o diagrama de Ishikawa para a unidade analisada:

Figura 7: Diagrama de Ishikawa para a Unidade 1 e primeira visita.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com as causas identificadas, pode-se perceber que existem diversos pontos da unidade que carecem de atenção além dos pontos referentes a geração de energia elétrica com biogás, como a operação do biodigestor, estrutura para transporte de biogás e até os equipamentos elétricos adjacentes ao sistema de geração, bem como a rede interna em baixa tensão e os pontos de medição para proteção elétrica do sistema.

#### 4.1.2. Aplicação da matriz SWOT reduzida

Ao analisar as causas identificadas com a construção do diagrama de Ishikawa sobre o aspecto dos cenários, percebe-se que as sub-causas, mesmo que estejam sob a mesma causa raiz, podem estar sob aspectos diferentes, dessa forma, para ilustrar fez-se a construção da matriz SWOT reduzida, com as causas identificadas e classificadas quanto à ambiente interno ou externo. Na Tabela 1 estão organizadas as informações quanto aos ambientes e em conformidade com o modelo de matriz SWOT reduzida proposto:

Tabela 1: Matriz SWOT reduzida para falhas identificadas com o Diagrama de Ishikawa.

<b>Ambiente Interno</b>	<b>Ambiente Externo</b>
Mão de obra local não treinada para manutenção especializada.	Distância do fornecedor do grupo motogerador em 400 km.
Método de manutenção inadequado.	Peças do grupo motogerador com custo elevado.
Método de alimentação do biodigestor e rotina de operação inadequado.	Peças do grupo moto gerador fora de linha.
Falta de SPDA – Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas.	Incidência elevada de raios.
Local do grupo motogerador com excesso de poeira e partículas suspensas.	Instabilidade da rede da concessionária.
Rede interna com cabos de alumínio e subdimensionada.	Transformador 1:1 exigido em norma.
Matéria prima das tubulações em PVC.	Despacho limitado pelos parâmetros de proteção para tensão da concessionária.
Distância elevada entre medição, proteção e geração.	Norma restritiva para geração de energia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Partindo de uma análise breve, percebe-se que os itens possuem aspecto legal, econômico, social, cultural e técnico, alguns inclusive mais de um aspecto. Como a tabela é baseada nas causas para as falhas, identifica-se fraquezas e ameaças. Contudo, para que se possa construir o questionário, foram consideradas oportunidades e pontos fortes.

A matriz SWOT, conforme a Figura 5, não será evidenciada. As análises pontuais, para ambiente interno e externo foram realizadas em forma de conceitos sobre o projeto para as causas das falhas, no entanto, são as lições aprendidas sobre as causas das falhas identificadas no diagrama de Ishikawa e classificadas quanto à cenário pelo método SWOT, que são discutidas uma a uma na próxima seção.

#### **4.1.3. Discussão dos resultados da primeira iteração e visita**

O cenário e as causas levantadas quanto ao relacionamento do cliente com a concessionária, fornecedores e apoiadores do projeto, serve de subsídio para idealização dos

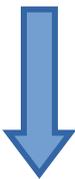
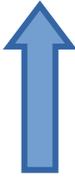
itens conceituais do questionário. Cada conceito/questão apresenta cinco opções de resposta dentro da realidade para projetos de geração de energia elétrica com biogás. O questionário deve levar consigo os resultados da análise das falhas e, dessa forma, propiciar que estas não sejam repetidas, favorecendo o aspecto de melhoria contínua.

Estes conceitos devem permitir a comparação entre o que foi realizado e a expectativa do cliente. Não foram incluídos conceitos sobre normas técnicas ou normas de segurança, pois não é cogitada a opção de não atender às normas. Os conceitos averiguados são apresentados nos tópicos abaixo:

#### 4.1.3.1. Legislação para geração distribuída e isolada

O primeiro conceito, apresentado no Quadro 1, aborda a legalidade do sistema de Geração Distribuída (GD) no local de instalação da unidade. As Resoluções normativas 482 e 687 (ANEEL, 2012 e 2015) garantem o acesso ao sistema de distribuição, onde as concessionárias definem as limitações técnicas em acordo com o sistema de distribuição (ANEEL, 2016).

Quadro 1 – Conceito sobre legislação para Geração Distribuída e Isolada.

<b>Legislação para Geração Distribuída e Geração Isolada</b>	<b>Geração Distribuída</b>	<b>Operação Isolada</b>
Não Permitido		
Permitido, complexo e difícil acesso		
Permitido e complexo		
Permitido e simplificado		
Subsidiado		

Fonte: Elaborado pelo autor.

A questão sobre o aspecto técnico e legal da GD para o projeto requer um estudo prévio da norma ou procedimento de conexão da concessionária de energia elétrica local ou, ainda, uma reunião de esclarecimento sobre o assunto com o setor de medição regional da concessionária, quando não há um setor específico na empresa.

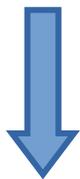
Em alguns casos como de permissionárias ou companhias de eletrificação rural a conexão pode até não ser permitida, mesmo que o consumidor esteja amparado pelas resoluções normativas 482/2012 e 687/2015. Percebendo que este é um aspecto que pode tornar impeditiva a conexão em GD, observando a legalidade do projeto, deveria ser

averiguado antes da elaboração do projeto, caso a pretensão seja a conexão em GD com paralelismo permanente.

#### 4.1.3.2. Mercado para energia elétrica

No segundo aspecto, Quadro 2, considera-se a legalidade para os modelos de contrato de energia elétrica, no que tange o aspecto econômico, sendo estes para o modelo de contratação ou compensação em conformidade ao caderno temático da ANEEL (2016) para micro e minigeração distribuída.

Quadro 2 – Conceito sobre mercado de energia elétrica.

<b>Mercado para geração de energia elétrica</b>	<b>Facilidade de implantação</b>	<b>Rendimento em kWh/m<sup>3</sup></b>
Geração própria e isolada		
Compartilhada local		
Compensação local		
Compensação compartilhada		
Contrato por 5 anos ou mais		

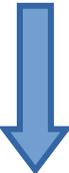
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como oportunidade, possuir um parceiro para implantação da unidade de produção de biogás e geração de energia elétrica é uma possibilidade que ganhou força com a publicação da RN 687 em novembro de 2015 (ANEEL), ampliando as possibilidades para modelos de negócios e arranjos técnicos para geração compartilhada, inclusive no formato de condomínio.

#### 4.1.3.3. Impostos

Os impostos para energia elétrica (PIS/COFINS e ICMS), sendo que o ICMS possui caráter estadual. A partir de 2015 passou a ser permitido às unidades federativas concederem isenções para ICMS por períodos de 4 (quatro) anos com possibilidade de renovação ao término de cada período. Contudo, considerando que o CONFAZ 16 foi aprovado e publicado antes da publicação da RN 687/2015 (ANEEL), a isenção de ICMS abrange unidades com potência inferior à 1 (um) Mega Watt (MW). Já o PIS/COFINS é taxa federal e incide sobre toda energia consumida (ANEEL,2016). No Quadro 3 é apresentado a relação deste conceito sobre o aspecto econômico e legal.

Quadro 3 – Conceito sobre custo dos impostos

<b>Impostos</b>	<b>Retorno por kWh</b>	<b>Incentivo Legal</b>
ICMS		
Desconto do ICMS		
Subsidiado		
Sem ICMS		
Isolado		

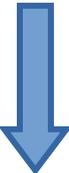
Fonte: Elaborado pelo autor.

Atualmente todos os Estados aderiram ao CONFAZ 16, que dá as prerrogativas para os incentivos fiscais do ICMS sobre a energia elétrica oriunda da geração com fontes renováveis. Ao exemplo que no estado do Paraná, mesmo que não houvesse adesão ao Convênio, não há cobrança do ICMS para unidades rurais, sendo assim não se paga ICMS da energia consumida em caso de compensação remota na unidade geradora classificada com atividade rural (PARANÁ).

#### 4.1.3.4. Preço da energia elétrica

O preço da energia elétrica é de fato um aspecto decisivo para quem investe em geração própria, já que o retorno do investimento com relação a economia com energia elétrica é palpável. Para falar da viabilidade ainda serão observados outros aspectos, visto que este é um dos motivadores apenas. No quadro 4, apresenta-se o conceito/questão sobre este custo.

Quadro 4 – Conceito sobre o custo da energia elétrica por kWh.

<b>Preço da energia elétrica</b>	<b>Viabilidade de implantação</b>	<b>Retorno do investimento</b>
Abaixo de R\$ 0,15/kWh		
Em torno de R\$ 0,25/kWh		
Em torno de R\$ 0,40/kWh		
Em torno de R\$ 0,65/kWh		
Acima de R\$ 0,75/kWh		

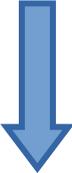
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores para energia elétrica utilizados nesse conceito são baseados nos encontrados na página da COPEL Distribuição para taxas e tarifas da energia elétrica.

#### 4.1.3.5. Lucro cessante por falta de energia elétrica

A falta de energia elétrica tem importância diferente dentro de cada segmento comercial, rural ou industrial, pois refere-se intrinsecamente ao processo produtivo em que se utiliza a energia elétrica. O Quadro 5 apresenta a relação deste conceito sobre os aspectos técnico e econômico.

Quadro 5 – Conceito sobre lucro cessante pela falta de energia elétrica.

<b>Lucro cessante por falta de energia elétrica (custo da falta)</b>	<b>Viabilidade de implantação</b>	<b>Necessidade de Potência</b>
Inexistente ou muito baixo		
Baixo		
Médio		
Alto		
Muito alto		

Fonte: Elaborado pelo autor.

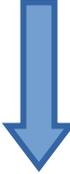
Nesse caso, o indicador econômico dita mais sobre evitar perdas pela falta de energia elétrica, justificando investimentos em geração própria, mesmo que seja um sistema para geração isolada. A falta de energia elétrica pode causar impacto econômico, sendo que enquanto indicador técnico deste aspecto, o sistema de geração deve ser dimensionado para atender o setor, processo ou instalação demandante da energia elétrica em sua totalidade, no menor espaço de tempo possível. Este arranjo difere do arranjo que visa redução do custo com consumo de energia elétrica por meio da geração distribuída.

#### 4.1.3.6. Custo médio do investimento em R\$/kW da unidade geradora

O custo das unidades geradoras, Quadro 6, pode variar por diversos motivos, desde custos de importação, para máquinas estrangeiras, como pelo escopo de entrega do sistema e o nível tecnológico exigido para o arranjo.

As faixas de custo por kW foram apresentadas com base em orçamentos realizados entre 2017 e 2019, considerando o custo instalado da unidade geradora, periféricos para segurança de operação e acessórios de proteção exigidos pelas concessionárias.

Quadro 6 – Conceito sobre o custo médio da potência instalada.

<b>Investimento médio em R\$/kW para implantação da unidade geradora</b>	<b>Atenção sobre escopo técnico</b>	<b>Retorno do investimento</b>
Abaixo de R\$ 1.500/kW		
Em torno de R\$ 2.500/kW		
Em torno de R\$ 3.500/kW		
Em torno de R\$ 4.500/kW		
Acima de R\$ 6.000/kW		

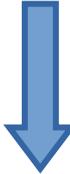
Fonte: Elaborado pelo autor.

Financeiramente, quanto menor o custo do equipamento, menor o tempo de retorno do investimento. Contudo, no arranjo técnico geral, deve ser observado os componentes constantes da entrega como, sistema de controle e monitoramento da unidade geradora, que permita conexão GD em paralelo permanente ou, ao menos, que seja compatível com ampliações futuras, disponibilidade de peças no mercado, entrega técnica do sistema (comissionamento ou somente entrega), custo de instalação, dentre outros custos que em primeiro momento podem parecer invisíveis mas, no momento da execução do projeto podem ser técnica e financeiramente impeditivos.

#### **4.1.3.7. Distância da filial do fornecedor ou prestador de serviços até o local de geração**

A correlação deste aspecto é direta em relação ao lucro cessante e valor da energia elétrica por kWh, visto que denota sobre o tempo de disponibilidade da máquina e custos de manutenção. No Quadro 7 são apresentadas as relações deste conceito com os aspectos técnico e econômico.

Quadro 7 – Conceito sobre proximidade do fornecedor.

<b>Distância da filial do fornecedor de GMG e serviços técnicos</b>	<b>Demora para atendimento</b>	<b>Custo das Manutenções</b>
Abaixo de 100 km		
Em torno de 250 km		
Em torno de 400 km		
Em torno de 600 km		
Acima de 1.000 km		

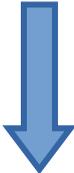
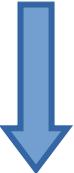
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta relação, quanto maior a distância do fornecedor do local de implantação, possivelmente maior será o tempo entre a reclamação e o atendimento, bem como tempo de máquina inoperante e, proporcionalmente, o custo da manutenção especializada, que está vinculada ao custo de deslocamento.

#### 4.1.3.8. Contrato de manutenção do grupo motogerador

Normalmente pensado após a escolha do fornecedor, sugere-se com o questionário que este aspecto deve ser negociado de forma prévia ao fornecimento e, quanto maiores foram as garantias, maior a segurança de implantação do empreendimento. No Quadro 8 é apresentada a relação entre manutenção planejada e os aspectos técnico e econômico.

Quadro 8 – Conceito sobre manutenção planejada na compra.

<b>Contrato de manutenção do GMG</b>	<b>Disponibilidade de máquina</b>	<b>Garantia da viabilidade</b>
Sem garantia e somente corretiva		
Corretiva e troca de óleo		
Preventiva vinculada às horas de operação		
Com garantia, vinculada às horas de operação		
Com garantia, preventiva e vinculada às horas de operação		

Fonte: Elaborado pelo autor.

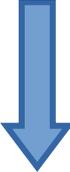
A segurança do planejamento econômico e técnico para implantação de uma unidade geradora requer a observação de diversos pontos técnicos. Contudo, a observação contratual e econômica sobre as rotinas de manutenção está correlacionada com a correta forma de analisar a viabilidade de um empreendimento de geração. A elaboração de um contrato de manutenção amplo pode garantir a segurança financeira de um projeto de geração, evitando indisponibilidade da máquina e indisposição dos fornecedores para atendimento de demandas relevantes.

#### 4.1.3.9. Disponibilidade do combustível e segurança do fornecimento

A disponibilidade do biogás para geração de energia elétrica, tanto em quantidade como qualidade, é indispensável para analisar a viabilidade de implantação. Observa-se que este aspecto está correlacionado com o ambiente externo, biomassa e clima, bem como, com o

interno, qualidade da operação e manutenção do sistema. Sendo apresentado o conceito no Quadro 9:

Quadro 9 – Conceito sobre disponibilidade de combustível.

<b>Disponibilidade de Combustível e Segurança no fornecimento</b>	<b>Disponibilidade de máquina</b>	<b>Viabilidade de Implantação</b>
Sazonal e com variação na qualidade		
Sazonal com boa qualidade		
Proporcional à demanda e com variação de qualidade		
Sobra biogás, com variações de qualidade		
Sobra biogás e com boa qualidade		

Fonte: Elaborado pelo autor.

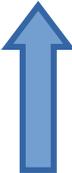
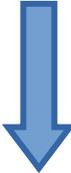
A geração de energia elétrica com biogás depende da quantidade e qualidade do combustível. A sazonalidade impacta sobre o dimensionamento da máquina e do sistema de transporte e armazenamento. A qualidade do combustível, considerando variação dos contaminantes e poder calorífico, atua diretamente sobre a frequência de manutenções a serem realizadas, bem como sobre o tempo de disponibilidade da máquina.

Outro ponto que será influenciado pela qualidade do combustível será o fator de conversão do biogás para energia elétrica, visto a variação do poder calorífico do combustível, de maneira a manter a potência programada para o sistema, o consumo de biogás será superior. Essa variação da qualidade deve ainda influenciar nas manutenções, considerando que quando o gás se torna muito pobre em poder calorífico, a mistura torna-se igualmente pobre e, dessa forma, ocorre o aumento gradativo da temperatura na máquina tendo por consequência a necessidade de manutenções frequentes.

#### **4.1.3.10. Custo de operação em R\$/kWh produzido**

O custo de operação da unidade geradora, Quadro 10, tem forte relação com a sustentabilidade econômica do projeto, além de o custo de geração influenciar ainda no regime de operação para o projeto. Sendo este conceito estritamente relacionado com o aspecto econômico.

Quadro 10 – Conceito sobre custo de produção em relação à concessionária.

<b>Custo de operação em R\$/kWh</b>	<b>Viabilidade GI</b>	<b>Viabilidade GD</b>
Maior que o da concessionária		
Equivalente ao da concessionária		
Pouco abaixo ao da concessionária		
Em torno de 30% mais barato		
Em torno de 50% mais barato		

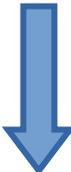
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os custos de operação podem ser obtidos de duas maneiras: por meio do balanço energético da unidade, considerando os consumos de energia elétrica para produção, tratamento, armazenamento e transporte do biogás até a aplicação ou, identificando os custos de operação e manutenção fornecidos pelos fabricantes, como: trocas de óleo, peças de reposição, custo de manutenção e energia consumida dos componentes e, dessa forma, identificar qual seria o custo do kWh produzido para comparação ao fornecido pela concessionária. A comparação deste custo com a tarifa da energia elétrica disponibilizada pela concessionária fornece o indicador de viabilidade para a operação do sistema. A viabilidade para operação isolada ocorreria pela questão do lucro cessante ou prejuízos em caso de interrupção do fornecimento.

#### 4.1.3.11. Qualidade do fornecimento de energia elétrica

A qualidade da energia pode ser avaliada em duas dimensões: continuidade do fornecimento e níveis de tensão adequados, conforme apresentado no Quadro 11.

Quadro 11 – Conceito sobre disponibilidade da rede da concessionária.

<b>Qualidade da energia elétrica fornecida pela concessionária</b>	<b>Viabilidade GI</b>	<b>Viabilidade GD</b>
Demora a retornar e há oscilações		
Interrupções e oscilações frequentes		
Demora a retornar, sem oscilações		
Há interrupções, sem oscilações		
Sem interrupções ou oscilações		

Fonte: Elaborado pelo autor.

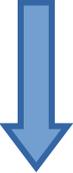
Por tratar-se de um conceito relacionado com aspectos estritamente técnicos, na avaliação da qualidade da energia elétrica devem ser considerados os fatores técnicos, estes

são encontrados tanto no site da ANEEL como nas faturas de energia elétrica. É preciso considerar que a qualidade percebida pelo consumidor certamente será divergente da informação da concessionária, portanto deve ser realizada uma ação de factibilidade, ou seja, ou a qualidade é medida, ou aceita-se a informação disponibilizada pela concessionária para o planejamento.

#### 4.1.3.12. Necessidade de tratamento dos resíduos

Quando ocorre a necessidade de tratamento dos resíduos produzidos pode se dizer que o biogás se torna um subproduto do processo de produção, visto que o sistema de tratamento está atrelado à cadeia produtiva e não à cadeia energética em primeiro momento. No Quadro 12 é apresentada a relação desse conceito sobre o aspecto ambiental.

Quadro 12 – Conceito sobre o aspecto ambiental.

Necessidade de tratamento dos resíduos por método anaeróbio	Justifica aproveitamento energético	Possibilidade de fornecedores próximos
Não há regulação ou fiscalização		
Há regulação mas sem fiscalização		
Opção economicamente viável		
Necessário o tratamento		
Necessário o tratamento por método anaeróbio		

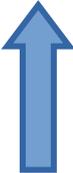
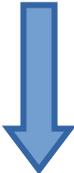
Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o aproveitamento energético do biogás, deve ser avaliado o funcionamento do sistema de produção de biogás e tratamento da biomassa, para que a produção seja estável e com pouca variação nas suas características. A questão de regulação e fiscalização acaba contribuindo para a formação de fornecedores locais, ou seja, cria-se a cultura e o conhecimento local para soluções adequadas à realidade local. Dessa forma, caso o local onde o projeto está inserido tenha fiscalização e regulamentação é interessante avaliar os projetos já instalados na região e buscar uma referência de qualidade.

#### 4.1.3.13. Mão de obra para operação

A capacitação e motivação do operador da planta de biogás e geração de energia elétrica é um fator imprescindível para o sucesso do empreendimento. No Quadro 13 pode ser observada a relação deste conceito sobre os aspectos técnico e social.

Quadro 13 – Conceito sobre qualificação e disponibilidade de mão de obra.

Mão de obra para operação	Custo de Manutenção	Custo de operação e confiabilidade
Não há operador		
Contratará e treinará o operador		
Operador sem treinamento		
Operador treinado e monitoramento local das variáveis		
Operador treinado e monitoramento remoto das variáveis		

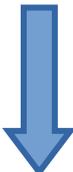
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da capacidade e motivação do operador, deve haver comprometimento, visto que a maioria dos projetos ainda possuem monitoramento exclusivamente dependente do operador. Esse conceito fala um pouco também sobre a cultura local, visto que a possibilidade de haver um operador treinado indicaria que existem outros projetos de biogás na região.

#### 4.1.3.14. Confiabilidade necessária nas máquinas

O nível de confiabilidade do sistema define a necessidade de automação e potência. A relação deste conceito com os aspectos técnicos é apresentada no Quadro 14.

Quadro 14 – Conceito sobre a confiabilidade do sistema de geração de energia elétrica.

Necessidade de confiabilidade	Nível tecnológico	Quantidade de GMGs
Pode desligar		
Operação enquanto houver biogás		
Operação em horários definidos		
Operação contínua		
Não pode ficar sem energia elétrica		

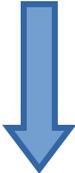
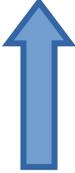
Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto maior a dependência energética sobre o sistema de geração de energia elétrica a biogás, maior o nível de automação necessário para o processo tornar-se confiável. Utilizar redundâncias para geração seria uma outra opção. Contudo, o custo pode ser superior ao de automação e monitoramento do processo.

#### 4.1.3.15. Necessidade de potência

A necessidade de potência da unidade geradora é algo definido pelas características da carga, da qualidade de energia elétrica necessária ou da demanda da unidade.

Quadro 15 – Conceito sobre demanda e necessidade de potência.

<b>Necessidade de potência</b>	<b>Potência da máquina</b>	<b>Viabilidade da GD</b>
Somente cargas de baixa potência		
Cargas pequenas e FP baixo		
1 equipamento com até 30% da potência total		
1 equipamento com até 50% da potência total		
Equipamentos com potência acima de 50% da capacidade da planta		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessa relação da carga com a potência da unidade geradora, deve ser avaliada a descrição das cargas instaladas e seu método de partida, de maneira a avaliar a capacidade de operação isolada.

#### 4.1.4. Análise preliminar e 1ª versão do questionário

Os conceitos apresentados, compõem o questionário/formulário para avaliação e apoio à tomada de decisão sobre projetos de geração de energia elétrica com biogás. O questionário foi preenchido em 2018, considerando as informações do diagrama de Ishikawa referentes à primeira visita realizada na Fazenda Iguaçu - Starmilk, em 2017. Na Tabela 2 é apresentada ilustração do questionário preenchido.

A primeira análise com os resultados do questionário foi sobre a conexão com a rede de distribuição. Para tal, soma-se em uma coluna os pontos que favorecem a geração distribuída e em outra os da geração isolada, na sequência divide-se pelos pontos possíveis para GD e GI. Como último passo é realizada a divisão dos pontos alcançados pelos pontos possíveis.

Tabela 2: Questionário preenchido do projeto Fazenda Iguazu – Star Milk.

Critérios para tomada de decisão em implantação de projetos de biogás para energia elétrica								
Item	Descrição	Aspecto	1	2	3	4	5	Valor
1	Legislação para GD e GI	Legal	não permitido	Permitido, complexo e difícil acesso	Permitido e complexo	Permitido e simplificado	Subsidiado	3
2	Mercado para energia elétrica	Legal Econômico	Isolado	Compartilhada local	Compensação local	Compensação compartilhada	Contrato direto por período superior a 5 anos	3
3	Impostos	Legal Econômico	ICMS	Desconto no ICMS	Subsidiado	Sem ICMS	Isolado	2
4	Preço da energia elétrica	Econômico	barata	observável	média	relevante	alta	3
5	Lucro cessante com falta de energia (custo da falta de energia elétrica)	Técnico Econômico	inexistente ou muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto	4
6	Custo médio do investimento em R\$/kW	Econômico	Maior que 6000	~4500	~3500	~2500	Menor que 1500	4
7	Distância da filial do fornecedor ou prestador de serviços	Técnico Econômico	Maior que 1000 km	~600	~400	~250	Menor que 100 km	3
8	Contrato de manutenção do GMG	Técnico Econômico	Sem garantia e somente corretiva	Corretiva e troca de óleo	Manutenção preventiva vinculada às horas de funcionamento	Com garantia, vinculada ao uso da máquina	Com garantia, preventiva e vinculada ao uso da máquina	1
9	Disponibilidade do combustível e segurança do fornecimento	Técnico Econômico	Sazonal com variações de qualidade	Sazonal com boa qualidade	Proporcional a demanda com variações de qualidade	Sobra biogás com variações de qualidade	Sobra biogás e de boa qualidade	3
10	Custo da operação em R\$/kWh	Econômico	Mais caro que o fornecido pela concessionária	Mesmo que o oferecido pela concessionária	Pouco abaixo do fornecido pela concessionária	~30% mais barato que a concessionária	~50% mais barato que a concessionária	3
11	Qualidade do fornecimento da energia elétrica fornecida pela concessionária	Técnico	Demora a retornar e há oscilações	Há interrupções e oscilações frequentes	Demora a retornar mas sem oscilações	Há interrupções mas sem oscilações	Ótima, DEC e FEC zerados e sem oscilações	2
12	Necessidade de tratamento dos resíduos	Ambiental	Não há regulação ou fiscalização	Há regulação mas sem fiscalização	Opção economicamente viável	Necessário o tratamento	Necessário o tratamento dos resíduos por método anaeróbio	2
13	Mão de obra para operação	Técnico Social	Não há e ainda não sabe quem vai operar	Está contratando e dever-á ser treinado	Já possui e receberá treinamento	Já possui e treinada. Com monitoramento local	Operador treinado e sistema de monitoramento remoto	3
14	Confiabilidade necessária nas máquinas	Técnico	Pode desligar	Funcionamento enquanto possuir combustível	Funcionamento com horários predefinidos	Funcionamento 24 horas com paradas	Nunca desligar	3
15	Necessidade de potência	Técnico	Somente cargas pequenas na demanda	Cargas pequenas com FP baixo	1 Equipamento com até 30% da demanda da planta	1 Equipamento com até 50% da demanda da planta	Equipamentos com potência acima de 55% da demanda	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na primeira análise sobre os resultados evidencia-se que atualmente a unidade analisada opera em geração distribuída, opção que gerou despesas elevadas para implantação e alimentou as expectativas econômicas do cliente. Contudo, o resultado ponderado para esta visita indica que a operação isolada deve ter preferência sobre a geração distribuída enquanto a unidade permanece com os problemas relacionados com ambiente interno (projeto) e alguns problemas de ambiente externo (normas e condições da rede).

Outro ponto de destaque, obtido pelo mesmo método, para geração isolada e distribuída, aponta que o planejamento da manutenção é crítico no projeto. Haja visto que se a avaliação e apoio à tomada de decisão fosse utilizado por este cliente antes da implantação da conexão em GD, evitaria custos com modificações e poderia redirecionar o recurso para solução de outros problemas que provavelmente estariam mais evidentes, como as rotinas de manutenção ou o próprio regime de operação do sistema de produção de biogás.

A análise inicial dos resultados indica que há riscos, como: a dificuldade de conexão, legislação ambiental, falta de operador treinado, distância do fornecedor da solução de geração e a disponibilidade de combustível. Novamente indicando que são pontos críticos a serem solucionados antes de investir em outros setores, e que também indica necessidades imediatas de reavaliação do projeto existente. O repasse destas informações ao gestor da unidade ocasionou melhorias na unidade, que são perceptíveis na segunda visita realizada, onde as informações sobre os resultados são apresentadas na seção 4.4.

Com as informações e o formulário elaborado, foi realizada programação e visita nas duas unidades elencadas para a atividade, Granja São Pedro – Colombari e Cerâmica Stein. Como forma de reavaliar a unidade 1 após mudanças técnicas realizadas na Fazenda Iguazu, esta foi incluída no roteiro de visitas realizado em 25 de setembro de 2019.

## **4.2. Unidade 2 – Granja São Pedro – Colombari**

A segunda unidade visitada é a Granja São Pedro, de propriedade da família Colombari e instalada as margens do Parque Nacional do Iguazu em São Miguel do Iguazu no Oeste do Paraná. A unidade produz biogás com o tratamento de dejetos suínos há 11 (onze) anos, tendo seu primeiro biodigestor instalado pela AgCert, empresa que participou do processo de Créditos de Carbono.

Ainda em 2008 a unidade realizou a instalação da 1ª unidade geradora à biogás, utilizada para fornecer energia para a fábrica de ração que produz alimento balanceado para o

plantel de suínos. Desde 2010 a unidade conta com 2 (dois) biodigestores e em torno de 5.000 (cinco mil) suínos em terminação, o que permite a produção média diária de 770 m<sup>3</sup> de biogás, os quais são utilizados em uma unidade geradora à biogás de 104 kVA, conectada em GD com a potência ativa limitada em 75 kW.

Figura 8: Imagem Ilustrativa da Granja São Pedro com seus dois biodigestores.



Fonte: CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás.

A energia gerada no local permite a redução do custo com energia elétrica e ainda a redução na fatura de outras 4 (quatro) unidades consumidoras cadastradas para os benefícios da GD como Autoconsumo Remoto. Além disso, a configuração do sistema de proteção permite a operação isolada em momentos de contingência da rede de distribuição, proporcionando segurança energética para a unidade.

A aplicação do formulário ocorreu na manhã do dia 25 de setembro de 2019, tendo como respondente o Sr. Pedro Colombari, responsável pela operação e manutenção dos biodigestores e unidades geradoras. As informações coletadas durante o preenchimento do formulário podem ser visualizadas na Tabela 13. Ao passo que as avaliações e considerações sobre a análise do formulário preenchido podem ser lidas na seção 4.5.

Tabela 3: Questionário preenchido pelo Sr. Pedro Colombari, resultados da unidade Granja São Pedro.

Critérios para tomada de decisão em implantação de projetos de biogás para energia elétrica								
Item	Descrição	Aspecto	1	2	3	4	5	Valor
1	Legislação para GD e GI	Legal	não permitido	Permitido, complexo e difícil acesso	Permitido e complexo	Permitido e simplificado	Subsidiado	3
2	Mercado para energia elétrica	Legal Econômico	Isolado	Compartilhada local	Compensação local	Compensação compartilhada	Contrato direto por período superior a 5 anos	4
3	Impostos	Legal Econômico	ICMS	Desconto no ICMS	Subsidiado	Sem ICMS	Isolado	4
4	Preço da energia elétrica	Econômico	barata	observável	média	relevante	alta	2
5	Lucro cessante com falta de energia (custo da falta de energia elétrica)	Técnico Econômico	inexistente ou muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto	4
6	Custo médio do investimento em R\$/kW	Econômico	Maior que 6000	~4500	~3500	~2500	Menor que 1500	5
7	Distância da filial do fornecedor ou prestador de serviços	Técnico Econômico	Maior que 1000 km	~600	~400	~250	Menor que 100 km	2
8	Contrato de manutenção do GMG	Técnico Econômico	Sem garantia e somente corretiva	Corretiva e troca de óleo	Manutenção preventiva vinculada às horas de funcionamento	Com garantia, vinculada ao uso da máquina	Com garantia, preventiva e vinculada ao uso da máquina	1
9	Disponibilidade do combustível e segurança do fornecimento	Técnico Econômico	Sazonal com variações de qualidade	Sazonal com boa qualidade	Proporcional a demanda com variações de qualidade	Sobra biogás com variações de qualidade	Sobra biogás e de boa qualidade	5
10	Custo da operação em R\$/kWh	Econômico	Mais caro que o fornecido pela concessionária	Mesmo que o oferecido pela concessionária	Pouco abaixo do fornecido pela concessionária	~30% mais barato que a concessionária	~50% mais barato que a concessionária	5
11	Qualidade do fornecimento da energia elétrica fornecida pela concessionária	Técnico	Demora a retornar e há oscilações	Há interrupções e oscilações frequentes	Demora a retornar mas sem oscilações	Há interrupções mas sem oscilações	Ótima, DEC e FEC zerados e sem oscilações	2
12	Necessidade de tratamento dos resíduos	Ambiental	Não há regulação ou fiscalização	Há regulação mas sem fiscalização	Opção economicamente viável	Necessário o tratamento	Necessário o tratamento dos resíduos por método anaeróbio	5
13	Mão de obra para operação	Técnico Social	Não há e ainda não sabe quem vai operar	Está contratando e dever-á ser treinado	Já possui e receberá treinamento	Já possui e treinada. Com monitoramento local	Operador treinado e sistema de monitoramento remoto	4
14	Confiabilidade necessária nas máquinas	Técnico	Pode desligar	Funcionamento enquanto possuir combustível	Funcionamento com horários predefinidos	Funcionamento 24 horas com paradas	Nunca desligar	3
15	Necessidade de potência	Técnico	Somente cargas pequenas na demanda	Cargas pequenas com FP baixo	1 Equipamento com até 30% da demanda da planta	1 Equipamento com até 50% da demanda da planta	Equipamentos com potência acima de 55% da demanda	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3. Unidade 3 – Cerâmica Stein – Sr. Romário Schaefer

A Cerâmica Stein, de propriedade do Sr. Romário Schaefer, está localizada em Entre Rios do Oeste, também no Oeste do Estado do Paraná. Além da produção de artefatos cerâmicos oriundos da argila vermelha, como tijolos e lajetas, o Sr. Romário decidiu inovar. Como a indústria instalada demanda muita energia elétrica (70 MWh/mês), foi decidido por ele que uma maneira de manter a rentabilidade da indústria, seria reduzindo o custo da energia elétrica e automatizando os processos, o que consumiria ainda mais energia elétrica.

Dessa forma, a chave seria reduzir o custo da energia elétrica. E, dentre as opções avaliadas, o biogás apresentou maior atratividade. Mas como resíduo de cerâmica e tijolos não produzem biogás, decidiu que necessitava de uma fonte de biomassa de fácil manejo e rentável, dentro dessa decisão, resolveu trabalhar com 4 (quatro) granjas de suínos com o total de 3.000 animais no entorno da propriedade da cerâmica, tratando os dejetos e produzindo biogás nos fundos da indústria cerâmica, como pode ser visualizado na Figura 9.

A unidade instalada em 2013, conta com biodigestor de 2.000 m<sup>3</sup> com sistema de agitação, produzindo biogás suficiente para gerar 40% da energia consumida, que representa 60% de economia, considerando que a indústria está conectada como Grupo 'A' e possui tarifa de ponta e fora de ponta.

Figura 9: Imagem ilustrativa da Cerâmica Stein, granjas de suínos e biodigestor.



Fonte: Biokohler Biodigestores.

Durante a visita realizada em 25 de setembro de 2019, tive a oportunidade de entrevistar o Sr. Romário Schaefer, que prontamente dispôs-se a responder o questionário, o qual pode ter seu resultado visualizado na Tabela 4. Ao passo que as avaliações e considerações sobre a análise do formulário preenchido podem ser lidas na seção 4.5.

Tabela 4: Questionário preenchido pelo Sr. Romário Schaefer, resultados da unidade Cerâmica Stein.

Critérios para tomada de decisão em implantação de projetos de biogás para energia elétrica								
Item	Descrição	Aspecto	1	2	3	4	5	Valor
1	Legislação para GD e GI	Legal	não permitido	Permitido, complexo e difícil acesso	Permitido e complexo	Permitido e simplificado	Subsidiado	3
2	Mercado para energia elétrica	Legal Econômico	Isolado	Compartilhada local	Compensação local	Compensação compartilhada	Contrato direto por período superior a 5 anos	1
3	Impostos	Legal Econômico	ICMS	Desconto no ICMS	Subsidiado	Sem ICMS	Isolado	5
4	Preço da energia elétrica	Econômico	barata	observável	média	relevante	alta	5
5	Lucro cessante com falta de energia (custo da falta de energia elétrica)	Técnico Econômico	inexistente ou muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto	5
6	Custo médio do investimento em R\$/kW	Econômico	Maior que 6000	~4500	~3500	~2500	Menor que 1500	4
7	Distância da filial do fornecedor ou prestador de serviços	Técnico Econômico	Maior que 1000 km	~600	~400	~250	Menor que 100 km	5
8	Contrato de manutenção do GMG	Técnico Econômico	Sem garantia e somente corretiva	Corretiva e troca de óleo	Manutenção preventiva vinculada às horas de funcionamento	Com garantia, vinculada ao uso da máquina	Com garantia, preventiva e vinculada ao uso da máquina	3
9	Disponibilidade do combustível e segurança do fornecimento	Técnico Econômico	Sazonal com variações de qualidade	Sazonal com boa qualidade	Proporcional a demanda com variações de qualidade	Sobra biogás com variações de qualidade	Sobra biogás e de boa qualidade	2
10	Custo da operação em R\$/kWh	Econômico	Mais caro que o fornecido pela concessionária	Mesmo que o oferecido pela concessionária	Pouco abaixo do fornecido pela concessionária	~30% mais barato que a concessionária	~50% mais barato que a concessionária	5
11	Qualidade do fornecimento da energia elétrica fornecida pela concessionária	Técnico	Demora a retornar e há oscilações	Há interrupções e oscilações frequentes	Demora a retornar mas sem oscilações	Há interrupções mas sem oscilações	Ótima, DEC e FEC zerados e sem oscilações	2
12	Necessidade de tratamento dos resíduos	Ambiental	Não há regulação ou fiscalização	Há regulação mas sem fiscalização	Opção economicamente viável	Necessário o tratamento	Necessário o tratamento dos resíduos por método anaeróbio	N/A
13	Mão de obra para operação	Técnico Social	Não há e ainda não sabe quem vai operar	Está contratando e dever-á ser treinado	Já possui e receberá treinamento	Já possui e treinada. Com monitoramento local	Operador treinado e sistema de monitoramento remoto	4
14	Confiabilidade necessária nas máquinas	Técnico	Pode desligar	Funcionamento enquanto possuir combustível	Funcionamento com horários predefinidos	Funcionamento 24 horas com paradas	Nunca desligar	1
15	Necessidade de potência	Técnico	Somente cargas pequenas na demanda	Cargas pequenas com FP baixo	1 Equipamento com até 30% da demanda da planta	1 Equipamento com até 50% da demanda da planta	Equipamentos com potência acima de 55% da demanda	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4. Unidade 1 – Fazenda Iguaçu – Nova aplicação do questionário

Considerando a visita realizada em 2017 e o compartilhamento dos resultados da intervenção realizada durante a disciplina de seminários em 2018, ocorreram alterações no projeto de biogás para geração de energia elétrica da Fazenda Iguaçu, Star Milk. Dentre as alterações, ocorreu a troca do fornecedor de serviços de manutenção para a unidade geradora, pois após uma descarga atmosférica, a qual resultou na queima de diversos itens do controle eletrônico do grupo motogerador, decidiu-se realizar um teste com um novo fornecedor que estaria mais próximo, somente 40 km do local da unidade.

Para dar garantia de seus serviços, o novo fornecedor de serviços de manutenção do grupo motogerador corrigiu alguns problemas identificados na visita anterior, como:

- Alterou o ponto de medição do painel de proteção, eliminando as distorções por queda de tensão;
- Realizou um reforço da rede que conecta a unidade geradora às cargas e fonte da concessionária, reduzindo o problema de queda de tensão em 90%;
- Atualizou o sistema de controle da unidade geradora, que contava com peças fora de linha de fabricação e que possuíam elevado valor para substituição, incluindo nesta troca o controlador e relé de proteção, atuador de mistura e atuador de rotação da unidade geradora, permitindo o monitoramento remoto das variáveis operacionais da unidade geradora;
- Implementou um processo de automação para partida, parada e ajuste de potência da unidade geradora de forma remota, tanto via computador em rede como por unidades móveis com sistema *android*;
- Percebeu-se ainda um asseio para com a limpeza do recinto de geração (F), reduzindo consideravelmente a quantidade de partículas suspensas no ambiente.

Na Figura 10, é apresentado o novo arranjo interno do recinto de geração da unidade Fazenda Iguaçu – Starmilk, percebe-se o asseio e limpeza do local, que apresenta uma unidade geradora instalada com 330 kVA de potência e painéis para paralelismo permanente, Controle e proteção da unidade geradora e o transformador de isolamento galvânica de 300 kVA, exigido em Norma Técnica pela concessionária.

Figura 10: Imagem ilustrativa da situação do recinto de geração na Fazenda Iguaçu no dia 25 de setembro, onde pode-se visualizar uniade geradora de 330 kVA e painéis de proteção.



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

Com estas alterações percebe-se que o nível de satisfação do cliente com o projeto de biogás estava diferente da visita anterior. Em outra ponta, com alguns problemas resolvidos, surgiram outros, como multas por fator de potência, visto que com a operação do grupo gerador com alta capacidade, ocorreu uma alteração da configuração de reativos da unidade, pois a unidade geradora estava operando com Fator de potência unitário (sem fornecer reativos à rede ou para a carga), como forma de evitar contratemplos com o transformador de isolamento galvânica instalado junto à unidade geradora e exigido pela concessionária em norma técnica vigente.

Dessa maneira e por este contexto, decidiu-se aplicar novamente o questionário, com as informações atualizadas. Então, no dia 25 de setembro de 2019 foi realizada nova coleta de dados na unidade, tendo como entrevistado o administrador da unidade e médico veterinário, Sr. Mario Sossela Filho, mais conhecido como Marinho. As informações relativas às respostas do questionário podem ser visualizadas na Tabela 5. Ao passo que as avaliações e considerações sobre a análise do formulário preenchido podem ser lidas na seção 4.5.

Tabela 5: Questionário preenchido pelo Sr. Mario Sossela Filho, resultados da Fazenda Iguazu.

Critérios para tomada de decisão em implantação de projetos de biogás para energia elétrica								
Item	Descrição	Aspecto	1	2	3	4	5	Valor
1	Legislação para GD e GI	Legal	não permitido	Permitido, complexo e difícil acesso	Permitido e complexo	Permitido e simplificado	Subsidiado	3
2	Mercado para energia elétrica	Legal Econômico	Isolado	Compartilhada local	Compensação local	Compensação compartilhada	Contrato direto por período superior a 5 anos	2
3	Impostos	Legal Econômico	ICMS	Desconto no ICMS	Subsidiado	Sem ICMS	Isolado	4
4	Preço da energia elétrica	Econômico	barata	observável	média	relevante	alta	5
5	Lucro cessante com falta de energia (custo da falta de energia elétrica)	Técnico Econômico	inexistente ou muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto	5
6	Custo médio do investimento em R\$/kW	Econômico	Maior que 6000	~4500	~3500	~2500	Menor que 1500	3
7	Distância da filial do fornecedor ou prestador de serviços	Técnico Econômico	Maior que 1000 km	~600	~400	~250	Menor que 100 km	5
8	Contrato de manutenção do GMG	Técnico Econômico	Sem garantia e somente corretiva	Corretiva e troca de óleo	Manutenção preventiva vinculada às horas de funcionamento	Com garantia, vinculada ao uso da máquina	Com garantia, preventiva e vinculada ao uso da máquina	3
9	Disponibilidade do combustível e segurança do fornecimento	Técnico Econômico	Sazonal com variações de qualidade	Sazonal com boa qualidade	Proporcional a demanda com variações de qualidade	Sobra biogás com variações de qualidade	Sobra biogás e de boa qualidade	3
10	Custo da operação em R\$/kWh	Econômico	Mais caro que o fornecido pela concessionária	Mesmo que o oferecido pela concessionária	Pouco abaixo do fornecido pela concessionária	~30% mais barato que a concessionária	~50% mais barato que a concessionária	5
11	Qualidade do fornecimento da energia elétrica fornecida pela concessionária	Técnico	Demora a retornar e há oscilações	Há interrupções e oscilações frequentes	Demora a retornar mas sem oscilações	Há interrupções mas sem oscilações	Ótima, DEC e FEC zerados e sem oscilações	2
12	Necessidade de tratamento dos resíduos	Ambiental	Não há regulação ou fiscalização	Há regulação mas sem fiscalização	Opção economicamente viável	Necessário o tratamento	Necessário o tratamento dos resíduos por método anaeróbio	5
13	Mão de obra para operação	Técnico Social	Não há e ainda não sabe quem vai operar	Está contratando e deverá ser treinado	Já possui e receberá treinamento	Já possui e treinada. Com monitoramento local	Operador treinado e sistema de monitoramento remoto	5
14	Confiabilidade necessária nas máquinas	Técnico	Pode desligar	Funcionamento enquanto possuir combustível	Funcionamento com horários predefinidos	Funcionamento 24 horas com paradas	Nunca desligar	1
15	Necessidade de potência	Técnico	Somente cargas pequenas na demanda	Cargas pequenas com FP baixo	1 Equipamento com até 30% da demanda da planta	1 Equipamento com até 50% da demanda da planta	Equipamentos com potência acima de 55% da demanda	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.5. Comparações e Reflexões

Com as respostas aos questionários obtidas, nesta seção os resultados e impressões ao aplicar a pesquisa em campo, além de proposições de melhoria, serão apresentados por conceito, na mesma ordem em que foram apresentados na seção 4.1.3. Neste contexto considera-se essa, a segunda iteração.

Como forma de realizar a comparação entre as respostas no contexto de cada unidade, será considerado o momento em que o questionário foi respondido, visto que a Unidade 1 (um) foi visitada duas vezes durante a pesquisa, dessa forma será utilizada a nomenclatura abaixo para facilitar o entendimento do processo de análise:

- UD1a – Unidade 1 – Star Milk, visitada em 2017;
- UD1b – Unidade 1 – Star Milk, visitada em 2019;
- UD2 – Granja São Pedro – Colombari;
- UD3 – Cerâmica Stein – Sr. Romário Schaefer;

Na Tabela 6 podem ser verificadas os resultados para cada unidade.

Tabela 6: Resultados de aplicação do formulário para as unidades visitadas.

Item	Identificação do respondente	UD1a	UD1b	UD2	UD3
1	Legislação para GD e GI	3	3	3	3
2	Mercado para energia elétrica	3	2	4	1
3	Impostos	2	4	4	5
4	Preço da energia elétrica	3	5	2	5
5	Lucro cessante com falta de energia (custo da falta de energia elétrica)	4	5	4	5
6	Custo médio do investimento em R\$/kW	4	3	5	4
7	Distância da filial do fornecedor ou prestador de serviços	3	5	2	5
8	Contrato de manutenção do GMG	1	3	1	3
9	Disponibilidade do combustível e segurança do fornecimento	3	3	5	2
10	Custo da operação em R\$/kWh	3	5	5	5
11	Qualidade da energia elétrica fornecida pela concessionária	2	2	2	2
12	Necessidade de tratamento dos resíduos	2	5	5	N/A <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Neste caso não se aplica, pois a atividade fim da unidade é a produção de blocos cerâmicos.

Item	Identificação do respondente	UD1a	UD1b	UD2	UD3
13	Mão de obra para operação	3	5	4	4
14	Confiabilidade necessária nas máquinas	3	1	3	1
15	Necessidade de potência	4	5	5	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

As unidades descritas e avaliadas possuem diferentes histórias, motivações e justificativas para implantação de seus projetos, bem como, receberam recursos ou apoio técnico em diferentes momentos. Mais do que isso, as diferenças de escala, biomassa, operação e localização possuem grande influência sobre o resultado.

#### **4.5.1. Conceito 1 – Legislação para a geração distribuída e isolada**

Como apresentado no item 4.1.3.1, a legalidade e regulação vigente para a geração distribuída e isolada estão bem delineadas pela regulação e normas técnicas específicas, como as RN's 482, 687 e 786 (ANEEL 2012, 2015 e 2017), e, NTC's 905200, 903105 e 903107 (COPEL, 2019). Portanto, não causa espanto que a percepção dos 3 (três) respondentes tenham o valor ponderado 3 (três), indicando que todos consideram que há permissão para a geração distribuída, mas esta é considerada complexa.

Dentre os aspectos que remetem à complexidade identificada pelos clientes, o principal está relacionado aos prazos praticados pela concessionária para consultas e solicitação de acesso, a necessidade de extensos estudos de proteção, sendo necessário apresentação de estudos de: Fluxo de potência; Curto circuito; Estabilidade Transitória; e, Seletividade e Coordenação.

Em outra ponta compõem as entregas técnicas: projeto de locação; projeto de localização; projeto de malha de aterramento; projeto de proteção contra descargas atmosféricas; projeto elétrico da entrada de serviço; diagramas unifilares; diagramas trifilares de ligação; e, diagrama da lógica Linha Viva-Barra Morta (LVBM). Todos estes documentos ainda são acrescidos de Memorial Descritivo, folhas de dados e manuais dos equipamentos.

Dentre outros documentos, ainda são exigidos, Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), licença ou autorização ambiental para a atividade de geração de energia elétrica com biogás<sup>3</sup>, Descrição das Cargas Instaladas (DCI), e quando houver alteração de carga

---

<sup>3</sup> Licença ambiental ou autorização ambiental não são exigidos em projetos de energia solar até 300 kW, caso a movimentação de terra do projeto seja inferior à 100 m<sup>3</sup>.

contratada na concessionária, tudo isso deve ser precedido da solicitação de aumento de carga. Tais informações podem indicar que há ainda a necessidade de simplificação do processo de conexão para unidades geradoras á biogás.

Durante a aplicação do questionário, todos os respondentes citaram que não dominam o processo de conexão, haja visto que nenhum dos respondentes possui formação técnica na área elétrica. Dessa forma, para que se identifique diferentes respostas recomenda-se a aplicação deste questionário fora da área de concessão da COPEL, como forma de identificar se é uma percepção regional ou geral, ou até mesmo um gargalo para o avanço de projetos do gênero no Estado do Paraná.

Houve ainda a percepção de que o formato compacto do questionário provocava dificuldades para os respondentes, sendo sugerido que este seja construído no formato de questões objetivas.

#### **4.5.2. Conceito 2 – Mercado para geração de energia elétrica**

O segundo conceito remete ao mercado para energia elétrica, ou seja, em como é rentabilizada a geração de energia elétrica, se esta ocorre simplesmente evitando o consumo, se é um compartilhamento local, compensação, compartilhada por autoconsumo remoto, ou mesmo se há um modelo de negócio específico para compartilhamento de energia elétrica por consórcio ou cooperativa<sup>4</sup>.

Neste conceito, cada unidade apresentou uma resposta diferente, pois possuem diferentes modelos de negócio e percepções, neste contexto a análise individual é necessária e realizada abaixo:

- UD1a = 3, compensação Local: em 2017 iniciava-se a operação em geração distribuída, e o gestor da unidade via nessa opção o melhor resultado econômico, o que não aconteceu;
- UD1b = 2, compartilhada local: em 2019 a unidade retornou à operação em geração distribuída, contudo, não chega a injetar energia na rede elétrica, evitando interrupções na geração por sobretensão;
- UD2 = 4, compensação compartilhada: a energia gerada e compensada em outras unidades consumidoras registradas em nome do mesmo consumidor e

---

<sup>4</sup> A cooperativa possui um regime tributário diferenciado em relação ao consórcio, contudo, para formar uma cooperativa são necessários ao mínimo 20 participantes.

dentro da mesma área de concessão, realizando compensação por autoconsumo remoto;

- UD3 = 1, isolado: a unidade gera em acordo com sua carga, para tanto o máximo rendimento da unidade geradora ocorre à carga constante e em torno de 80% da capacidade nominal da máquina.

Nenhuma das unidades possui contrato para compartilhamento de energia por consórcio ou cooperativa, visto que todas já estão instaladas há mais de 4 (quatro) anos e tais modelos econômicos são mais recentes e decorrentes da consolidação da RN 687 (ANEEL, 2015).

#### **4.5.3. Conceito 3 – Impostos**

Novamente percebe-se divergência entre as respostas, contudo, o fato do resultado da UD1a indicar que recebe desconto do ICMS (2) e não indicar como a UD1b que é sem ICMS (4), remete ao fato do Estado do Paraná ter aderido ao convênio do ICMS somente no final de 2018. Já a UD3, por operar de forma isolada (5), não possui imposto algum sobre a energia gerada.

O fato, o resultado do conceito 3 (três) da UD1, evoluir da resposta 2 (dois) para a 4 (quatro), indica que ocorreu uma melhoria do ambiente regulatório em favor da geração distribuída entre 2017 e 2019, com a adesão do Estado do Paraná ao CONFAZ 16. Em outro ponto, está em discussão pela ANEEL a possibilidade de as concessionárias realizarem cobrança proporcional pela energia injetada no sistema, cobrando pelo uso do sistema de distribuição de energia elétrica sob sua concessão, o que pode indicar um novo arranjo para esta questão em breve, e como consequência, desfavorecer o avanço de implantação de projetos do gênero que consideram tanto a compensação local como o autoconsumo remoto. Tais alterações não surtem efeito sobre o gerador isolado.

Conforme as percepções anteriores é necessário apresentar o questionamento de forma mais extensa no questionário, como forma de aumentar a clareza do que está sendo perguntado ou respondido. Sugere-se ainda que o texto das respostas seja mais elaborado.

#### **4.5.4. Conceito 4 – Preço da energia elétrica**

O preço da energia é o motivador para buscar a implantação de um projeto de biogás para geração de energia elétrica. A resposta para esta questão foi divergente, para os casos UD1a (3) e UD1b (5), essa divergência é justificada por uma mudança realizada nas respostas para questão, que na versão de 2017 apresentavam valores numéricos entre 15 (quinze) e 75

(setenta e cinco) centavos por kWh, e na versão de 2019 uma escala de percepção sobre o preço da energia que têm como opções: barata; observável; média; relevante; e, alta.

Neste contexto, a percepção sobre o preço da energia elétrica está também vinculada à participação da energia na composição de custos das unidades, ao exemplo que a UD1b e UD3 indicam que o preço da energia é alto (5), enquanto a UD2 indica que é observável (2). Lembrando que a UD1 é uma leiteria, que utiliza energia elétrica para manter seus processos de ordenha e refrigeração, ao passo que a UD3 é uma cerâmica e utiliza energia elétrica para toda a movimentação de carga, ventilação e controle de seus processos.

Neste contexto percebe-se que o modelo de negócio de uma suinocultura não seria uma atividade demasiadamente eletrointensiva, contudo, pensando em projetos de geração de energia elétrica com biogás, é apresentada a possibilidade de modelos de negócio para compensação compartilhada, agregando renda ao produtor rural.

A alteração de valores numéricos para escala de percepção é importante para identificar a percepção do responsável pela unidade, contudo, no momento de preenchimento do questionário, trouxe dúvidas e gerou questionamentos sobre a definição de energia barata, observável ou alta.

#### **4.5.5. Conceito 5 – Lucro cessante por falta de energia elétrica**

Apesar do entendimento sobre o preço da energia elétrica ser divergente entre as unidades, a percepção sobre o prejuízo que a falta de energia elétrica pode causar apresenta consenso, UD1a e UD2, indicam que a falta de energia pode causar prejuízos de alta monta (4), já a UD1b e UD3 indicam que a falta de energia representaria um prejuízo muito alto, algo equivalente à perda da produção diária ou mesmo a perda de parte do plantel por falta de alimento ou água.

A UD3 justifica sua resposta pela automação de seus processos e pelo fato que operar a secagem dos artefatos cerâmicos em fornos à lenha. A variação de (4) para (5), na UD1 está ligada à evolução dos processos e a representatividade que foi internalizada à presença e operação da unidade geradora, que se reflete no investimento da unidade no sistema de geração à biogás e na aquisição de uma nova unidade geradora à diesel.

#### **4.5.6. Conceito 6 – Custo médio do investimento em R\$/kW da unidade geradora**

Os custos de investimento foram divergentes entre as unidades, principalmente pelos diferentes modelos de geração, participação em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento e escalas das unidades. Sendo que os resultados obtidos são:

- UD1a = 4, ~2500: em 2017 iniciava-se a operação em geração distribuída, e o gestor da unidade via nessa opção o melhor resultado econômico, e até então, não haviam ocorrido problemas mais sérios com a unidade geradora;
- UD1b = 3, ~3500: em 2019 a unidade retornou à operação em geração distribuída, após realizar substituição de todo o seu sistema de controle, que foi danificado por descarga atmosférica;
- UD2 = 5, ~1500: A unidade participou de diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento, recebendo aportes do FINEP e Itaipu para modernização de equipamentos e desenvolvimento de pesquisa. Na percepção do responsável pela unidade a implantação teve baixo custo;
- UD3 = 4, ~2500: o custo de implantação reduzido em relação à UD1b, se deve ao fato de não haver investimentos no projeto de geração distribuída, painéis de proteção, controlador de gerador e alterações da entrada de serviço, dessa forma, o custo de implantação da unidade é reduzido.

Novamente percebe-se que para diferentes modelos de negócio identificados haverão investimentos diferentes em escalas diferentes, considerando que no mercado nacional o custo das unidades geradoras reduz com o aumento da potência, pois equipamentos como atuadores e controladores utilizados em unidades de microgeração distribuída, possuem custos similares em relação a controladores de unidades maiores, que são utilizadas na minigeração, e, dessa forma, ocorre uma diluição do custo de automação nas unidades geradoras maiores.

#### **4.5.7. Conceito 7 – Distância da filial do fornecedor ou prestador de serviços até o local de geração**

Conforme informação apresentada no item 4.1.3.7., a distância que o fornecedor de serviços ou soluções para unidades geradoras está do local de geração será proporcional ao lucro cessante e ao custo de geração por kWh, visto que estes estão associados ao custo de

deslocamento, custos de manutenção e tempo para atendimento. Foram obtidos os seguintes resultados:

- UD1a = 3, ~400 km: esta consistia na causa de uma das principais queixas, que era sobre o custo de manutenção da unidade geradora;
- UD1b = 5, ~100: com a substituição do fornecedor de manutenção para a unidade geradora, a atenção ao sistema de geração se tornou mais frequente;
- UD2 = 2, ~600: Boa parte das manutenções é realizada pelo próprio agricultor, dessa forma a distância do fornecedor afeta somente o custo das peças. Na percepção do responsável pela unidade possui influência sobre o resultado da unidade, contudo não constitui um grande problema haja visto que as manutenções são do próprio responsável;
- UD3 = 5, ~100: O fato de a unidade operar de forma isolada, contribui para o uso de uma unidade simples e robusta, dessa forma, mais simples de manter, contudo, com a proximidade do fornecedor, são realizadas revisões periódicas com custo reduzido.

Outro ponto importante a destacar, é que ao realizar o compartilhamento das informações com a UD1, o mesmo trocou seu fornecedor de serviços para a unidade geradora, e estes tiveram acesso a pesquisa realizada, identificando que a distância de fato é um gargalo para as manutenções em unidades geradoras à biogás, devido a especificidade de alguns serviços, pois requerem parametrização de controladores e atuadores.

A solução pensada consiste na substituição do controlador antigo por outro com acesso à internet e conexão com computador, agora o cliente e fornecedor podem monitorar as variáveis operacionais da máquina pela internet, e quando ocorre algum problema, o diagnóstico é realizado em parceria com o operador, que conecta fisicamente seu computador ao controlador da unidade geradora e transfere a operação do computador para o fornecedor, que realiza os ajustes e parametrização de forma remota.

#### **4.5.8. Conceito 8 – Contrato de manutenção do grupo motogerador**

Novamente percebe-se a evolução da UD1, saindo de manutenções sem garantia e corretivas (1) para a manutenção preventiva vinculada às horas de funcionamento (3). Ao passo que a UD2 atualmente só realiza manutenções corretivas (1), pois a unidade está

próxima da revisão completa. Enquanto a UD3 também opera com a manutenção vinculada à quantidade de horas em operação (3) desde o início da operação.

Outro ponto interessante é que nenhum dos participantes da pesquisa realizou contratação de um plano de manutenção com o fabricante. Isso reflete na pouca maturidade do mercado, que trata unidades geradoras à biogás da mesma maneira que tratam qualquer outro implemento agrícola. Contudo, para possuir assertividade nessa afirmação, seria necessário estender a pesquisa para um número maior de unidades, sendo inviável tal pesquisa por questão de tempo e recursos humanos e econômicos.

#### **4.5.9. Conceito 9 – Disponibilidade do combustível e segurança no fornecimento**

Como premissa para avaliação ou apoio à tomada de decisão sobre arranjos técnicos e econômicos para geração de energia elétrica com biogás, a sua produção e qualidade desempenham um papel importante na formatação do arranjo.

A UD1 não realizou grandes alterações no sistema de produção de biogás, onde UD1a e UD1b possuem a produção de biogás proporcional a demanda, com variações de qualidade (3). Já a UD2, apresenta sobra de biogás e de boa qualidade (5). Ao passo que a UD3 indica uma produção sazonal, mas com boa qualidade (2).

A produção de biogás está conectada à vários fatores, dentre eles podemos citar:

- Tipo da biomassa: há diferenças de potencial de produção de biogás e estabilidade da qualidade de biomassa, o qual reflete sobre a produção de biogás;
- Temperatura ambiente: as variações abruptas de temperatura para sistemas de pequeno porte e sem aquecimento podem sofrer grandes variações no volume de produção de biogás;
- Manejo da biomassa: o regime de alimentação do biodigestor deve ser regrado da mesma forma que se realiza a alimentação de humanos e animais, em quantidade balanceada e de forma rotineira, alterações na composição da biomassa ou intervalos aleatórios com volumes discrepantes podem inviabilizar o uso energético do biogás;
- Presença de surfactantes ou bactericidas: em excesso pode colapsar o sistema de digestão de um reator anaeróbio, pois podem causar a morte das bactérias que produzem o biogás;

- Falta de manutenção no biodigestor: a falta de manutenções, como retirada de lodo, mantimento da estanqueidade do biodigestor e tubulações, podem causar desde a diluição do biogás ou colapso das bactérias anaeróbias.

Para os casos citados, há destaque para a UD2, onde sobra biogás de boa qualidade. Esse fato está vinculado ao potencial da suinocultura em terminação, no qual facilmente o potencial de produção de biogás é superior em até 300% sobre a quantidade de energia elétrica consumida no processo operacional da unidade.

Vale ressaltar que a qualidade do biogás possui influência sobre o rendimento e a quantidade das manutenções, pois caso o combustível perca poder calorífico (fato de ocorrência comum), o sistema de geração deve se adaptar ou pode ser danificado por sobreaquecimento.

#### **4.5.10. Conceito 10 – Custo de operação em R\$/kWh produzido**

O resultado para a UD1a, representa o período em que os custos de manutenção ainda não estavam consolidados, além de problemas recorrentes que geravam despesas operacionais. Em compensação UD1b, UD2 e UD3, indicaram que o custo de operação/geração é 50% mais barato em relação aos preços praticados pela concessionária (5).

Esta informação evidencia que há viabilidade em todos os projetos de biogás instalados e visitados, haja visto que o custo da energia elétrica é 50% inferior ao oferecido pela concessionária. Sendo importante ressaltar que, associado ao custo de operação está o programa de manutenção, com despesas para troca de óleo, filtros, entre outros. Esta informação possui vínculo forte com a gestão da unidade.

#### **4.5.11. Conceito 11 – Qualidade do fornecimento de energia elétrica**

A avaliação da qualidade de energia é um processo primordial para instalação de um sistema de geração de energia elétrica com biogás em geração distribuída. Considerando a estabilidade de rede para instalação de projetos à biogás, todos, sem exceção, indicaram que há interrupções com oscilações e interrupções frequentes (2).

Esta informação é preocupante, pois para que se faça geração distribuída, é necessário o correto funcionamento do sistema de distribuição, visto a sensibilidade elevada do sistema de proteção elétrica da unidade geradora e da conexão. Mas esta afirmação versa que a energia na área rural não apresenta qualidade razoável para manter a conexão.

#### **4.5.12. Conceito 12 – Necessidade de tratamento de resíduos**

Na avaliação deste conceito houve um desvio do método, haja visto que a UD3, produz blocos cerâmicos e não havia resíduo orgânico disponível para a produção de biogás, sendo necessário empreender em outro ramo de atividade que provesse biogás suficiente e viável para geração de energia elétrica.

A UD1a e UD1b novamente apresentam resultados divergentes, respectivamente, há regulação mas sem fiscalização (2) é necessário tratamento dos resíduos por tratamento anaeróbio (5), o que reflete o descontentamento com a solução em 2017 e a retomada do projeto em 2019. Atualmente a opinião do gestor da unidade é que este método de tratamento, com aproveitamento energético dos resíduos, é estratégico para o modelo de negócio da unidade, corroborando com a opinião do gestor da UD2, que indica que o tratamento por método anaeróbio é necessário (5).

#### **4.5.13. Conceito 13 – Mão de Obra para operação**

Na UD1, houve uma perceptível evolução do processo de geração de energia elétrica, com melhorias consideráveis na qualidade dos equipamentos, monitoramento e solução de problemas crônicos, motivando o operador a se qualificar, o que se reflete na resposta do gestor da unidade, que para UD1a indicou que já possuía mão de obra e que esta receberia treinamento (3) e para UD1b, o operador estava treinado e o sistema de monitoramento remoto implementado (5).

Além do treinamento do operador e melhorias físicas no empreendimento, a motivação do operador era perceptível durante a visita realizada, como pode ser visto na Figura 10, bem como o asseio do recinto de geração. Outro ponto, a presença frequente do fornecedor das manutenções da unidade geradora proporcionou segurança para o gestor da unidade planejar e realizar novos investimentos, inclusive no sistema de biodigestão.

A UD2 e UD3, possuem mão de obra treinada, porém com monitoramento local (4), visto que são geradores com mais de 4 (quatro) anos de uso e não houve troca de operador, a atividade já foi incorporada ao dia-a-dia.

#### **4.5.14. Conceito 14 – Confiabilidade necessária nas máquinas**

A intenção com esta questão foi identificar a necessidade de confiabilidade nas unidades geradoras, como forma de apoio a tomada de decisão quanto ao nível tecnológico da solução ou mesmo a relevância do fator de disponibilidade.

Para unidades geradoras nacionais, os fabricantes indicam que atualmente os fatores de disponibilidade entre horas de manutenção e disponíveis para operação estaria em 0,90. Para unidades geradoras importadas este valor pode ficar entre 0,94 e 0,95 para motogeradores e chegar à 0,999 para microturbinas, contudo, com um custo de implantação e manutenção equivalente.

Como forma de padronizar a aplicação dos questionários e avaliar a necessidade de revisão do modelo e redação propostos, a ajuda no entendimento do questionário durante a entrevista limitou-se ao esclarecimento dos termos técnicos, o que ficou claro na resposta para a questão 14 (quatorze).

Para a UD1a, o funcionamento da unidade geradora era indicado com horários predefinidos (3), já para a UD1b informou que a unidade pode desligar (1), em parte por conta do investimento realizado no sistema de geração à diesel, e, em parte pela interpretação da questão.

A UD2, pela visão de geração de energia elétrica como modelo de negócio, afinal são 9 (nove) anos de operação, possui horários predefinidos para operação (3). Já a UD3, que entende a geração como uma redução de custos indica que a unidade pode desligar (1).

Tais afirmações são discrepantes, por exemplo, das afirmações recebidas na questão 5 (cinco), sobre o custo por lucro cessante por falta de energia elétrica, onde todos entendem que este custo é alto ou muito alto. Tal resultado reforça a necessidade de reformular a redação da questão 14 (quatorze).

#### **4.5.15. Conceito 15 – Necessidade de potência**

O conceito sobre necessidade de potência é definido em acordo com as cargas da unidade produtiva, conforme apresentado no item 4.1.3.15. As definições ou dimensionamento da unidade geradora podem considerar diferentes aspectos de um arranjo de geração de energia elétrica com biogás.

Ao exemplo, o dimensionamento do grupo motogerador à biogás pode ser realizado em acordo com a disponibilidade de biogás, buscando otimizar o uso do combustível disponível com a maior viabilidade econômica, ou, quando se busca simplesmente atender todas cargas, o dimensionamento deve considerar a capacidade do gerador em responder a entrada de blocos de carga sem que ocorram distúrbios de frequência ou tensão fora dos limites especificados no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2018).

Ainda pode-se dimensionar a unidade geradora de forma otimizada, considerando a disponibilidade de combustível e as cargas prioritárias a serem atendidas, neste contexto, de forma que seja avaliada esta necessidade, ou para tomada de decisão sobre este assunto, foi elaborada a questão no formato apresentado. Dessa forma, os resultados obtidos com o questionário nas unidades foram:

- UD1a = 4, 1 (um) equipamento com até 50% da capacidade da demanda da planta: em 2017 a unidade possuía sistema de refrigeração com banco de gelo para resfriamento do leite, com potência instalada de 90 kW;
- UD1b = 5, Equipamentos com potência acima de 55% da demanda da planta: com a instalação das bombas de vácuo em redundância e o mantimento do banco de gelo, ocorre acionamento conjunto que configura um bloco de carga superior à 55% da capacidade da unidade geradora atual;
- UD2 = 5, Equipamentos com potência acima de 55% da demanda da planta: Boa a unidade possui uma fábrica de ração para processar grãos brutos em alimentação animal balanceada, onde o moinho da fábrica possui potência elevada em relação ao motogerador, como rotina operacional, a unidade inicia a operação do motogerador conectado com a rede de distribuição antes de acionar o moinho da fábrica, pois caso o contrário, não é possível conexão com a rede de distribuição pois os níveis de tensão estão fora dos requisitos de proteção da unidade geradora;
- UD3 = 3, 1 (um) equipamento com até 30% da capacidade da demanda da planta: o grupo motogerador já opera de forma isolada e foi dimensionado para esta situação, o processo da cerâmica não possui grandes cargas que impeçam este funcionamento, contudo, a condição atual permitiria a conexão com sistema de distribuição para operação sobre o ponto ótimo da planta.

#### **4.5.16. Análise de resultados da UD1a e UD1b**

A evolução perceptível do arranjo tecnológico existente e mesmo da percepção do gestor da unidade e operador fica evidente pelas respostas apresentadas às questões 4 (quatro), 5 (cinco), 7 (sete), 8 (oito), 10 (dez) e 13 (treze), onde foi apresentada evolução no arranjo, operador, metodologia de manutenção, otimização dos custos de manutenção, fornecedor, percepção e motivação dos atores do projeto. Tais alterações, somadas à melhoria do ambiente regulatório provocam um ambiente favorável à geração distribuída.

Dos pontos preocupantes e que ficam evidenciados como riscos ao projeto, estão as informações das questões 1 (um), 2 (dois), 3 (três) e 11 (onze), que versam sobre a legislação, mercado de energia, impostos e sobre a qualidade da energia fornecida, todos despertam atenção em relação à viabilidade técnica e econômica para geração distribuída, visto que somente o aumento de impostos somado à qualidade de energia são suficientes para provocar a inviabilidade do projeto e indicar risco suficiente para alterar a decisão sobre o arranjo de operação da unidade.

Como veredicto, as condições técnicas do projeto ainda requerem melhorias no âmbito da produção de biogás e possível aumento da potência da unidade geradora, contudo, as condições atuais do grupo motogerador indicam que, apesar dos riscos inerentes ao ambiente regulatório e instabilidade da rede de distribuição, é viável a geração em paralelismo permanente na UD1b, diferente do que foi apresentado anteriormente para a UD1a.

#### **4.5.17. Análise dos resultados da UD2**

Conforme a resposta obtida na questão 9 (nove), a UD2 possui produção de biogás superior à sua demanda energética, sendo possível propor um modelo de negócio para rentabilizar os excedentes de produção de energia elétrica. Este fator desperta o interesse econômico pelo projeto, favorecendo a tomada de decisão pela geração distribuída com paralelismo permanente pela oportunidade que representa.

Em outra ponta, como parte da análise para tomada de decisão, deve-se considerar os riscos evidenciados nas respostas das questões 4 (quatro), 7 (sete), 8 (oito), 11 (onze) e 13 (treze), que tratam respectivamente do: preço da energia, que pode limitar a renda do negócio; da distância do fornecedor atual que pode afetar os custos de manutenção; do modelo de contrato de manutenção atual, sem garantias; a falta de monitoramento remoto, evidenciando a necessidade de investimentos físicos para implementação do modelo de negócios; e, de forma recorrente a qualidade percebida da energia elétrica que pode limitar a exportação de energia elétrica.

Atualmente, conforme resposta da questão 2 (dois), (4) compensação compartilhada, a unidade já realiza o compartilhamento de seus créditos e unidades consumidoras de outros membros da família Colombari com sucesso, dessa forma, a unidade possui os requisitos para se manter em geração distribuída, sendo oportuno a implementação de monitoramento remoto do grupo motogerador.

#### **4.5.18. Análise dos resultados da UD3**

As respostas obtidas para as questões 1 (um), 3 (três), 6 (seis), 11 (onze) e 15 (quinze), apoiam o arranjo tecnológico atual da unidade para geração de energia elétrica de forma isolada, visto o perfil de cargas da unidade e a qualidade da energia disponibilizada pela concessionária no ponto de conexão, contudo, a resposta obtida na questão 9 (nove), (2) produção de biogás sazonal com boa qualidade, abre o precedente para a otimização do sistema de geração atual.

A diferença de rendimento na conversão do biogás em energia elétrica para sistemas conectados à rede e sistemas isolados é razoável, podendo em alguns casos chegar à 10% da eficiência global, representando até 25% a menos na produção de energia elétrica. No modelo atual, permanecer de forma isolada é interessante para a unidade, contudo, deve ser analisado a viabilidade econômica para investimento na conexão em paralelismo permanente, considerando um possível aumento no rendimento da unidade geradora, que representaria um acréscimo de até 25% na produção de energia elétrica.

Outro ponto vinculado à resposta da questão 9 (nove), evidencia-se que o aumento da produção de biogás é relevante para maximizar o investimento realizado no sistema de geração atual, ou seja, a unidade geradora atual atende boa parte das necessidades da UD3, contudo, caso houvesse disponibilidade maior de biogás, este seria utilizado e melhora o desempenho econômico do projeto, mesmo de forma isolada.

#### **4.6. Proposição de questionário, versão 2.0**

As lições aprendidas durante a aplicação do questionário, servem de base para reformular o formato e organização das informações. Dentre as lições aprendidas podemos destacar:

- O formato compacto e apresentado em tabela dificulta a leitura das informações, sendo sugerido a apresentação de questões objetivas;
- As abreviações devem ser evitadas, demonstrando clareza sobre os elementos de pesquisa;
- O texto deve ser elaborado de forma a garantir o entendimento do conteúdo da questão e sobre o que está sendo perguntado;

- Os termos técnicos podem ser dispensados, considerando que a maioria dos respondentes não possuem formação na área elétrica;
- Questões a respeito de investimentos e/ou custos, devem indicar sobre quais aspectos estão sendo avaliados;

Considerando estas informações e análises específicas para cada questão, foi elaborada uma nova versão do questionário.

## Questionário sobre arranjo tecnológico de geração de energia elétrica com biogás

Nome: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Local: \_\_\_\_\_ Potência: \_\_\_\_\_

**1) Sobre a legislação, regulação e normas referentes à geração distribuída (GD) conectada à rede e geração isolada (GI), você entende que no local do projeto:**

- a. Não é permitida conexão em GD;
- b. É permitida a conexão em GD, mas de difícil acesso;
- c. É permitida a conexão em GD com processo complexo;
- d. É permitida a conexão em GD com processo simplificado;
- e. É incentivado e subsidiado.

**2) Como é o modelo de negócio para a energia elétrica gerada?**

- a. Geração isolada, somente atende cargas da propriedade;
- b. Geração distribuída, mas não injeta energia na rede da concessionária;
- c. Geração distribuída em compensação na mesma unidade consumidora;
- d. Geração distribuída em compensação com outras unidades consumidoras;
- e. GD com rentabilização da energia excedente.

**3) Quantos aos impostos incidentes sobre a energia gerada e injetada na rede:**

- a. Paga ICMS, PIS/COFINS e tarifas do sistema de distribuição;
- b. Paga ICMS e PIS/CONFINS;
- c. Sem ICMS, paga PIS/COFINS;
- d. Nenhum imposto incidente para compensação;
- e. Geração isolada, sem impostos de qualquer natureza sobre a energia elétrica.

**4) Sobre sua percepção quanto ao preço pago pela energia elétrica:**

- a. A energia é barata e pouco representativa nos custos da unidade;
- b. A energia é barata, mas é representativa nos custos da unidade;
- c. A energia possui um preço justo;
- d. A energia é cara, mas pouco representativa nos custos da unidade;
- e. A energia é cara e representativa nos custos da unidade.

**5) Qual sua percepção quanto ao custo ou prejuízo em caso de falta de energia elétrica, ou sua baixa qualidade devido a oscilações e desligamentos frequentes:**

- a. Não há custos com interrupções no fornecimento de energia, ou são muito baixos;
- b. Custos baixos com interrupções no fornecimento de energia;
- c. Custos médios com interrupções no fornecimento de energia;
- d. Custos altos com interrupções no fornecimento de energia;
- e. Não pode faltar energia, ou os custos são muito altos.

- 6) Qual o custo de implantação do projeto de geração de energia com biogás? Do biodigestor à conexão com rede de distribuição:**
- Mais de R\$ 7.500/kW instalado;
  - Em torno de R\$ 6.000/kW instalado;
  - Em torno de R\$ 4.500/kW instalado;
  - Em torno de R\$ 3.000/kW instalado;
  - Menos de R\$ 1.500/kW instalado.
- 7) Distância da filial ou matriz do fornecedor de peças e serviços do gerador:**
- Maior que 1.000 km;
  - Em torno de 600 km;
  - Em torno de 400 km;
  - Em torno de 250 km;
  - Menos de 100 km.
- 8) Como é a rotina de manutenção proposta ou realizada para a unidade geradora?**
- Manutenção corretiva, sem garantias do fabricante;
  - Manutenção corretiva e trocas de óleo programadas;
  - Manutenção preventiva em acordo com o manual do fabricante;
  - Manutenção preventiva e corretivas realizadas pelo fornecedor;
  - Contrato de manutenção fechado, com garantias do fornecedor.
- 9) A quantidade e qualidade do biogás, como são?**
- Produção de biogás é sazonal com variações de volume e qualidade acentuadas;
  - Produção de biogás é sazonal e inferior a necessidade, com qualidade instável;
  - Produção de biogás é proporcional a necessidade, com qualidade instável;
  - Produção proporcional ou superior a necessidade, com qualidade estável;
  - Produção superior a necessidade e com qualidade estável.
- 10) Em sua percepção, o custo de operação e manutenção do projeto de produção de biogás e geração de energia elétrica em R\$ por kWh gerado é:**
- Custo da energia gerada superior ao fornecido pela concessionária;
  - Empata com o valor cobrado pela energia fornecida pela concessionária;
  - Pouco abaixo do valor cobrado pela energia fornecida pela concessionária;
  - Em torno de 30% abaixo do valor cobrado pela concessionária;
  - Em torno de 50% abaixo do valor cobrado pela concessionária.

**11) Em sua percepção, a qualidade da energia fornecida pela concessionária e as interrupções de fornecimento ocorrem como?**

- a. Falta com frequência, demora a retornar e há oscilações;
- b. Falta com frequência e há oscilações;
- c. Demora a retornar, mas não ocorrem oscilações frequentes;
- d. Há interrupções, mas sem oscilações;
- e. Dificilmente ocorrem interrupções ou oscilações.

**12) Quanto a necessidade de tratamento dos resíduos do projeto, você observa que:**

- a. Não regulação ou fiscalização sobre o tratamento dos resíduos produzidos;
- b. Há regulação, mas não ocorre fiscalização pelos órgãos competentes;
- c. Os resíduos devem ser tratados com uma opção economicamente viável;
- d. Os resíduos devem ser tratados para permitir a operação da unidade;
- e. Os resíduos devem ser tratados por método anaeróbio com produção de biogás.

**13) Quanto a mão de obra disponibilizada para operação do sistema de produção de biogás e geração de energia elétrica:**

- a. Não tem operador e ainda não sabe quem vai operar;
- b. Ainda não possui operador, mas deve ser treinado;
- c. Possui operador, mas precisa treinamento;
- d. Possui operador treinado com monitoramento local das variáveis de operação;
- e. Possui operador treinado com monitoramento remoto das variáveis da operação.

**14) Quanto a confiabilidade requerida ao gerador durante a operação e disponibilidade esperada do equipamento**

- a. Não problemas na indisponibilidade da máquina, ou em sua parada repentina;
- b. O grupo motogerador opera enquanto há combustível disponível;
- c. Unidade geradora deve operar em horários pré-definidos;
- d. Funcionamento contínuo com paradas para manutenção (24/7);
- e. Unidade deve estar sempre disponível ou em operação, com fator de disponibilidade acima de 94%.

**15) Quanto ao tipo de cargas elétricas instaladas na unidade, estas são:**

- a. Somente cargas pequenas e demanda reduzida;
- b. Cargas pequenas, mas com corrente de partida elevada;
- c. Entre as cargas, há 1 (um) equipamento que representa em torno de 30% da potência instalada da unidade;
- d. Entre as cargas, há 1 (um) equipamento que representa até 50% da potência instalada da unidade;
- e. Entre as cargas, há 1 (um) equipamento que representa mais de 50% da potência instalada da unidade.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa realizada mostrou o tema de geração de energia elétrica com o biogás. Considerando as suas características, os formatos de arranjos tecnológicos, processos para conversão em energia elétrica, a interferência das características do processo de produção do biogás sobre o rendimento de unidades geradoras. Além de apresentar de forma breve o marco regulatório brasileiro, que regulamenta a atividade e sua conexão com o sistema elétrico.

As metodologias qualitativas, Diagrama de Ishikawa e Matriz SWOT em sua forma reduzida, foram apresentadas como ferramentas para análise das unidades participantes da pesquisa, sendo estas metodologias aplicadas à avaliação da UD1a (Fazenda Iguazu – Star Milk), em primeiro momento. Com estes resultados foi proposta a primeira versão do método em formato de questionário, apresentado na Tabela 2. Estes mesmos resultados da análise foram encaminhados aos responsáveis pelo gerenciamento da unidade.

Com esta primeira versão procedemos com a aplicação do método/questionário em outras 02 (duas) unidades, UD2 – Granja São Pedro – Colombari e UD3 – Cerâmica Stein, além de retornar à Fazenda Star Milk (UD1b) para nova aplicação, visto que foram realizadas melhorias técnicas na unidade, posteriores à apresentação dos resultados. Essa nova aplicação permitiu ajustar a metodologia/questionário com a análise dos resultados obtidos de forma a propor uma nova versão, que é apresentada na seção 4.6 desta dissertação.

Após a análise dos dados, buscando responder as perguntas sobre o dimensionamento dos sistemas e a construção e elaboração de arranjos técnicos e econômicos para geração de energia elétrica com biogás, bem como, qual a influência do ambiente em que estão inseridos sobre a decisão e escolha do formato do arranjo técnico e econômico, com isso concluímos que os dimensionamentos estão relacionados com as cargas elétricas presentes na unidade e a disponibilidade de biogás. O método proposto indica, em linhas gerais, qual a necessidade de cada projeto em acordo com o ambiente em que está inserido, considerando entre outros: a disponibilidade e qualidade do biogás; a característica das cargas da planta; o fator de disponibilidade dos geradores adequado ao projeto; o lucro cessante da unidade pela falta de energia elétrica; e ainda, como a regulação, impostos e valor da energia elétrica podem afetar a configuração de uma arranjo técnico e econômico para geração energia elétrica.

Com o desenvolvimento e aplicação do método proposto, percebemos que os resultados econômicos e de satisfação do cliente não dependem simplesmente dos equipamentos

instalados em uma configuração padrão, que possa ser copiada de um lugar para outro. Projetos de biogás dependem do ambiente em que estão inseridos e devem ser adequados diante disso, sendo que o cliente/gestor da unidade e sua percepção, fazem parte da construção do arranjo apropriado para o ambiente.

Neste sentido, as condições ambientais influenciam a definição do arranjo técnico e econômico em acordo com as premissas e riscos oferecidos, percebemos que, caso a regulação, impostos e qualidade energia sejam desfavoráveis, os indicadores apontam que o projeto adequado deve considerar a geração isolada, de forma a evitar a frustração do cliente com o investimento. E, além disso, verificamos que o sucesso de uma geração isolada está ligado às condições de produção de biogás e atendimento adequado das cargas existentes. Da mesma forma, percebemos que a disponibilidade de uma boa conexão com o sistema de distribuição, que permite a injeção de excedentes de geração, atrelada à uma regulação adequada, pode fomentar a implantação de centrais de geração distribuída como unidades de negócio, na região onde há as condições ambientais favoráveis.

Durante o desenvolvimento da pesquisa verificamos que o ambiente regulatório e de desenvolvimento das tecnologias relacionadas com a produção de biogás e geração de energia elétrica renovável apresentam mudanças constantes. Há uma perceptível evolução do marco regulatório para geração distribuída, associada com a implementação de empreendimentos inovadores em questão de tecnologia e modelos de negócio, o que são indícios de um mercado pujante e crescente.

Considerando que nosso objetivo principal era “Construir um método de apoio a tomada de decisão sobre a configuração de arranjos técnicos e econômicos em projetos de geração de energia elétrica com biogás, considerando variáveis qualitativas referentes ao ambiente em que a unidade está ou será inserida”. Pudemos aferir que após análises para apoio a decisão sobre arranjos técnicos e econômicos em 03 (três) unidades, com diferentes escalas e ambientes, realizadas a partir da aplicação do método proposto na seção 4.5 e na proposição de questionário apresentada na seção 4.6, apresentamos o questionário resultante desta pesquisa e o método proposto, que pode e deve ser utilizado como ferramenta para identificar falhas, realizar diagnósticos, melhorar arranjos e, principalmente, permitir que os arranjos atendam as expectativas dos clientes em projetos de geração de energia elétrica com biogás.

A aplicação deste método vai além da adequação do arranjo técnico e econômico de um projeto para geração de energia elétrica ao ambiente em que este se situa, tal método pode ser

utilizado por instituições de fomento ou financiamento para identificar o risco em projeto, permitindo a melhoria das condições de crédito ou mesmo para aprimorar os mecanismos para análise de risco. Certamente, tal método favorece a celeridade e assertividade na elaboração e definição de arranjos para tais projetos, garantindo que a experiência e conhecimento oriundos da base teórica desta pesquisa se façam presentes nas análises realizadas, reduzindo o tempo e custo com elaboração dos arranjos, projetos ou planejamentos.

A aplicação sucessiva do método permite ainda a identificação de gargalos do ambiente em que os arranjos são propostos, sendo estes tecnológicos, sobre os fornecedores, equipamentos e mão de obra para operação e manutenção, ou mesmo sobre as políticas públicas, como regulação, normas técnicas regionais, políticas de incentivo ou impostos. Por fim, podem ser um indicador regional sobre a qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica, visto que operações em Geração Distribuída são possíveis, se e somente se, a rede elétrica da concessionária apresentar os requisitos mínimos necessários, como estabilidade de tensão, frequência e constância de fornecimento.

O método aplicado apresentou efetividade, no qual percebemos uma melhora significativa tanto na percepção do cliente como nos resultados econômicos do projeto da Unidade 1, Fazenda Iguaçu – Star Milk, destacados na seção 4.5.16. Após a primeira análise e compartilhamento dos resultados com o gestor da unidade, ocorreu uma evolução perceptível em aspectos relacionados com a escolha do arranjo e o ambiente interno do projeto, como: qualificação do operador; metodologia de manutenção; otimização dos custos de manutenção; e, escolha de novo fornecedor de serviços para o gerador, proporcionando uma nova e perceptível motivação dos diversos participantes do projeto.

Identificar os problemas relacionados com o ambiente externo do projeto, como: legislação e regulação limitados; mercado de energia desfavorável; e, qualidade de energia incompatível com a geração distribuída, são identificados como resultados da análise. Considerando que, tais problemas, na visão do gestor da unidade, recaíam sobre os fornecedores de soluções para geração de energia elétrica, painéis de proteção, equipamentos e serviços do projeto e não sobre os órgãos responsáveis por tal condição ambiental desfavorável, dificultando a construção de um relacionamento positivo entre os envolvidos no projeto e o gestor da unidade.

Há ainda expectativas de melhoria nas unidades UD2 e UD3, Granja São Pedro e Cerâmica Stein. A apresentação dos resultados aos gestores, apontando as oportunidades de

melhoria relacionadas com o ambiente interno, arranjo tecnológico, e externo, regulação e impostos, onde as unidades estão inseridas, abre uma nova oportunidade para a continuidade desta pesquisa e aprimoramento do método/questionário.

Por fim, pensando na contribuição que este método pode apresentar, e recordando os indicadores apresentados na introdução dessa dissertação, indicamos alguns pontos de melhoria e desenvolvimento de pesquisas futuras:

- Aplicar o questionário em unidades fora da área de concessão da Copel Distribuição S.A., de maneira a identificar se a percepção sobre o processo de conexão se alterará fora da área de concessão<sup>5</sup>;
- Aplicar o questionário em unidades fora da área de concessão da Copel Distribuição S.A. e fora da região Oeste do Estado do Paraná, de maneira a identificar se a percepção sobre a qualidade da energia elétrica se alterará fora da área de concessão ou fora de região Oeste do Paraná;
- Desenvolver um algoritmo de análise considerando os resultados ponderados propostos pelo questionário em sua primeira versão, e dessa forma, em uma etapa quantitativa processar os dados para uma resposta mais rápida;
- Realizar a aplicação do método em unidades em diversas regiões do país, de maneira a identificar os riscos ambientais para projetos de geração de energia elétrica com biogás nas diferentes regiões do país, permitindo assim a proposição de políticas públicas ou projetos de pesquisa e desenvolvimento alinhados com os riscos e limitações de cada região.

---

<sup>5</sup> Há 4 (quatro) municípios no Estado do Paraná que não estão na área de concessão da Copel Distribuição S.A., Jacarezinho, Barra do Jacaré e Ribeirão Claro estão sob concessão da CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) e Guarapuava sob concessão do grupo Energisa. Ao passo que o município de Porto União, em Santa Catarina está sob concessão da COPEL mas situa-se em outro estado.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE SUÍNOS. **Mapeamento da Suinocultura Brasileira**. 1ª Edição, 376p., Brasília – DF, 2016

ALEMANHA. MINISTÉRIO DA NUTRIÇÃO AGRICULTURA E DEFESA DO CONSUMIDOR DA ALEMANHA (BMELV). (Ed.). **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5. ed. Gülzow-prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe E. V. (fnr), 2013.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída**. Brasília: 2016, 2ª ed.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 77**, de 18 de agosto de 2004. Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidrelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 167**, de 10 de outubro de 2005. Estabelece as condições para a comercialização de energia proveniente de Geração Distribuída.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 235**, de 14 de novembro de 2006. Estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogradoras de energia e dá outras providências.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 247**, de 21 de dezembro de 2006. Estabelece as condições para a comercialização de energia elétrica, oriunda de empreendimentos de geração que utilizem fontes primárias incentivadas, com unidade ou conjunto de unidades consumidoras cuja carga seja maior ou igual a 500 kW e dá outras providências.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 323**, de 8 de julho de 2008. Estabelece os critérios e procedimentos para a informação, registro, aprovação e homologação pela ANEEL dos contratos de comercialização de energia elétrica.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Acessada em 07/02/2017 e disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Acessada em 07/02/2017 e disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP Nº8**, de 30 de janeiro de 2015. A presente Resolução aplica-se ao Biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais. Acessada em 08/06/2019 e disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/janeiro&item=rانp-8--2015>

AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental**. Guaratinguetá. Teses de Doutorado. UNESP, 2001.

ASANO, A. M. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica da Utilização de Geração Diesel no Horário de Ponta**. 2015. 59 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2015.

BONA, F. S. de; RUPPERT FILHO, E. **As microturbinas e a geração distribuída**. Em: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. Anais Online: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.phpscript=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022004000100018&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.phpscript=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000100018&lng=en&nrm=abn) . Acesso em: 20 Oct. 2015

BRASIL. **Lei n 10.848, de 15 de março de 2004**. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nos 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências.

BRASIL. **Decreto n 5.163, de 30 de julho de 2004.** Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética Brasileira, **Plano Decenal 2030**, pag. 150.

BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING -- ENCIT 2006, 11., 2006, Curitiba. **Conversão de motores diesel para gás natural.** Curitiba: Abcm, 2006. 44 p.

BRENNEISEN, P. J. **Desempenho de motogerador de ciclo diesel operando com gás de gaseificação/diesel ou biogás/diesel.** 2013. 41 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, Cascavel, 2013.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2012. v. 1

CAMPOS, V. F.; **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês).** 7. ed. Belo Horizonte: Bloch, 1992.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** 5. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** 7. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 2013.

CHAEMCHUEN, S.; KABIR, N. A.; ZHOU, K.; VERPOORT, F. **Metal – organic frameworks for upgrading biogas via CO2 adsorption to biogas green energy.** Chem. Soc. Rev. 42, p.9304-9332, 2013.

CIBIOGÁS. **Nota Técnica: N°002/2018 – Características técnicas do biogás.** Foz do Iguaçu, novembro de 2018.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia Elétrica. **NTC 903105: geração própria – operação em paralelismo momentâneo.** Paraná, 2011.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia Elétrica. **NTC 903107: geração própria – operação isolada em emergência.** Paraná, 2011 e 2019.

COPEL – Companhia Paranaense de energia elétrica. **Taxas e tarifas**, acessado em 11 de julho de 2017. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ftarifas%2Fpagcope12.nsf%2Fverdocatual%2F23BF37E67261209C03257488005939EB>

DIEESE - DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS. **Comportamento das Tarifas de energia elétrica no Brasil, Nota Técnica nº147**. Agosto de 2015. Acessado 06 de fevereiro de 2017 e disponível em: <http://www.dieese.org.br/notatecnica/2015/notaTec147eletricidade.pdf>

ISHIKAWA, K. **Controle de qualidade total: à maneira japonesa**. Rio de Janeiro: Campus, 1993.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Suinocultura de Baixa Emissão de Carbono**. 1ª Edição, 96p., Brasília – DF, 2016

MARQUES, C. A. **Microgeração de energia elétrica em uma propriedade rural utilizando biogás como fonte primária de energia elétrica**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, Cascavel, 2012.

PARANÁ. **Decreto 3531, Alteração 966**, Curitiba, 2016.

PEREIRA, J. C. **Motores e Geradores**. 121 p., 2009.

PINTO, R.O. **Avaliação da digestão anaeróbia na lioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado**. 2006. 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) Programa de Pós graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

PIVETA, G. P. **Estudo dos Grupos Geradores Síncronos**. 2010. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade São Francisco, Campinas, 2010.

PÚBLIO, M. A. **Como planejar e executar uma campanha de propaganda**. São Paulo: Atlas, 2008.

SOUZA, R. G. de. **Desempenho do conjunto motogerador adaptado a biogás.** 2006. 40 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SOUZA, S. N. M. de et al. **Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 28, p.48 385–391, dez. 2013.

SILVA, F. P. **Eficiência energética de uma unidade de microgeração de energia elétrica a partir do biogás da suinocultura.** 2015. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, Cascavel, 2015.

SILVA, M. J., SOUZA, S. N. M., SOUZA, A. A., RICIERY, R. P., FRACARO, G. P. M. **Microgeneration of electricity with producer gas in dual fuel mode operation.** Eng. Agríc.. 2011, v.31, no. 5, p. 879-886.

TARAPANOFF, K. (org). **Inteligência Organizacional e Competitiva.** Brasília: Editora UNB, 2001.

TAVARES, M. C. **Gestão estratégica.** 3 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

ZANK, J.C.C., BRANDT, L.S., BEZERRA, R.C., PEREIRA, E.N. (NO PRELO). **As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis.** Revista Exacta.

## **APÊNDICE 1**

### **NOTA TÉCNICA Nº 002/2018 – Características técnicas do biogás.**

Nota técnica elaborada para indicar as características físicas e químicas do biogás, bem como para dar esclarecimentos sobre o uso da NBR15213:2008 na correlação entre as características químicas e físicas, indicando a influência da alteração da composição química do biogás sobre as características físicas, que por sua vez provocam alterações que afetam o dimensionamento dos equipamentos.

Em outra ponta, é indicada as características médias do biogás encontradas na literatura, ou as comumente encontradas em campo, como forma de prover dados básicos e referências para estimativas e estudos de viabilidade técnica e econômica.

## CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO BIOGÁS



### 1. INTRODUÇÃO

A geração distribuída e a promoção do uso de fontes renováveis têm atraído considerável interesse da sociedade nos últimos anos, devido à diversos fatores, tais como a melhoria da segurança e diversificação da matriz energética. Nesse contexto, a evolução técnica das tecnologias utilizando fontes energéticas renováveis está sendo impulsionada, propiciando o uso de fontes alternativas, como o biogás – foco do estudo.

Para o desenvolvimento de estudos, projetos e implantações de unidades de produção e uso do biogás, é necessário possuir informações precisas e confiáveis sobre este energético, compreendendo a equivalência energética com outros combustíveis, identificando os requisitos técnicos necessários para adequação de equipamentos que operem com essa fonte,

verificando os equipamentos necessários para concepção e posteriormente os utilizados para conversão deste gás em energia, seja térmica, elétrica ou veicular.

Nessa Nota Técnica, o objetivo é analisar as propriedades do biogás, destacando as informações contidas na literatura especializada e na norma NBR 15.213 (2008), documento que fixa os requisitos exigíveis para calcular o poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de *Wobbe* para o gás natural e outros combustíveis gasosos, em várias condições de referência. Como o biogás bruto se enquadra como um combustível gasoso, essa norma engloba as definição e determinação das propriedades relacionadas à energia contida no biogás.

## 2. CONCEITO E EQUACIONAMENTO

Conforme definido pela norma NBR 15.213 (2008) a densidade absoluta é a quantidade de massa por unidade de volume do gás a uma dada pressão e temperatura. Essa relação é determinada pelo tamanho, peso dos átomos e tipo de ligação química. Já a densidade relativa, ainda segundo a norma, é a relação entre a densidade absoluta de um gás e a densidade absoluta do ar seco com composição padronizada, nas mesmas condições de temperatura e pressão.

A densidade absoluta de um gás real depende da temperatura T e pressão p, e calcula-se pela Equação (1):

$$\rho_{(T,p)} = \frac{\rho_{i(T,p)}}{Z_{mis(T,p)}} \quad (1)$$

**Onde:**

$\rho_{(T,p)}$  é a densidade absoluta do gás real;

$\rho_{i(T,p)}$  é a densidade absoluta do gás ideal;

$Z_{mis(T,p)}$  é o fator de compressibilidade do gás no estado de referência.

Já a densidade absoluta do gás ideal também é dependente da temperatura e pressão, Equação (2):

$$\rho_{i(T,p)} = \left( \frac{p}{R \cdot T(K)} \right) \sum_{j=1}^N (x_j \cdot M_j) \quad (2)$$

**Onde:**

$\rho_{i(T,p)}$  é a densidade absoluta do gás ideal;

T(K) é a temperatura absoluta;

R é a constante molar dos gases;

$x_j$  é a fração molar do componente j;

p é a pressão absoluta;

$M_j$  é a massa molar do componente j.

A densidade relativa de um gás real a uma dada temperatura e pressão, pode ser representada pela Equação (3):

$$d_{(T,p)} = d_i \frac{Z_{ar(T,p)}}{Z_{mis(T,p)}} \quad (3)$$

**Onde:**

$d_{(T,p)}$  é a densidade relativa do gás real;

$d_i$  é a densidade relativa do gás ideal;

$Z_{ar(T,p)}$  é o fator de compressibilidade do ar seco no estado de referência;

$Z_{mis(T,p)}$  é o fator de compressibilidade do gás no estado de referência.

O conceito do fator de compressibilidade e o fator de compressibilidade do biogás serão discutidos e equacionados no tópico 5 e 6, respectivamente. Para o ar, valores comumente utilizados são representados conforme às Equações (4), (5) e (6):

$$T=0^\circ\text{C}, \quad P=1\text{atm} \quad Z_{ar(273,15\text{K},101,325\text{kPa})} = 0,99941 \quad (4)$$

$$T=15^\circ\text{C}, \quad P=1\text{atm} \quad Z_{ar(288,15\text{K},101,325\text{kPa})} = 0,99958 \quad (5)$$

$$T=20^\circ\text{C}, \quad P=1\text{atm} \quad Z_{ar(293,15\text{K},101,325\text{kPa})} = 0,99963 \quad (6)$$

E a densidade relativa do gás ideal é independente de qualquer estado de referência, sendo calculada pela Equação (7):

$$d_i = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \frac{M_j}{M_{ar}} \quad (7)$$

**Onde:**

$d_i$  é a densidade relativa do gás ideal;

N é o número total de componentes;

$x_j$  é a fração molar do componente j;

$M_j$  é a massa molar do componente  $j$ ;

$M_{ar}$  é a massa molar do ar de composição padrão.

### 3. DENSIDADE DO BIOGÁS

O biogás é um gás incolor e em alguns casos inodoro, dependendo da sua composição. A Tabela 1 apresenta a composição típica dessa mistura gasosa que forma o biogás.

**Tabela 1** - Composição química do biogás

Composto	Porcentagem na Mistura Gasosa (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 a 40
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	1 a 3
Azoto (N <sub>2</sub> )	0.5 a 2.5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0.1 a 1
Gás Sulfúrico (H <sub>2</sub> S)	0.1 a 0.5
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	0.1 a 0.5
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0.1
Água (H <sub>2</sub> O)	Variável

Fonte: Adaptado de ZACHOW, 2000.

A densidade do biogás pode ser calculada pelos equacionamentos apresentados anteriormente, quando sua composição é conhecida. Ou ainda, pode-se utilizar valores padrões já fundamentados por diversas bibliografias. O biogás é um gás leve e de fraca densidade. Mais leve do que o ar, essa fraca densidade faz com que ele ocupe um volume significativo e que a sua liquefação seja mais difícil, o que implica em desvantagens em termos de transporte, armazenamento e utilização conforme Tabela 2.

**Tabela 2** - Densidade do biogás conforme a concentração de metano.

Composição química	Densidade [kg.m <sup>-3</sup> ]
10%CH <sub>4</sub> e 90%CO <sub>2</sub>	1,8393
40%CH <sub>4</sub> e 60%CO <sub>2</sub>	1,4600
60%CH <sub>4</sub> e 40%CO <sub>2</sub>	1,2143
65%CH <sub>4</sub> e 35%CO <sub>2</sub>	1,1518
75%CH <sub>4</sub> e 25%CO <sub>2</sub>	1,0268
95%CH <sub>4</sub> e 05%CO <sub>2</sub>	0,7768
99%CH <sub>4</sub> e 01%CO <sub>2</sub>	0,7268

Fonte: IANNICELLI, 2008.

O Guia Prático do Biogás (FNR, 2013) apresenta valores de 1,2 kg.m<sup>-3</sup> para densidade do biogás. Seadi et al. (2008), considera o biogás com 50% de metano e densidade de 1,22 kg.m<sup>-3</sup>. Lemos (2013) apresenta a densidade relativa de biogás proveniente de esgoto com 67,5% de metano igual a 0,8148 m<sup>3</sup>.kg<sup>-1</sup>, ou seja, uma densidade igual à 1,2273 kg.m<sup>-3</sup>. Okamura (2013) faz uma comparação entre a densidade do biogás proveniente de aterros sanitário, com 45% de metano e de biogás proveniente de biodigestores com 65% de metano, sendo de 1,3 kg.m<sup>-3</sup> e 1,1 kg.m<sup>-3</sup> respectivamente. Assim, pode-se apresentar a Tabela 3 com as densidades relacionadas à porcentagem de metano e os autores dos dados:

**Tabela 3** - Valores de densidade referenciados

Autor	Porcentagem de CH <sub>4</sub>	Densidade [kg.m <sup>-3</sup> ]
Okamura (2013)	45%	1,3
Seadi et al. (2008)	50%	1,22
Iannicelli (2008)	60%	1,2143
Iannicelli (2008)	65%	1,1518
Okamura (2013)	65%	1,1
Lemos (2013)	67,5%	1,2273
FNR (2013)	-	1,2
<b>Média</b>	<b>58,75</b>	<b>1,2022</b>

Fonte: Adaptado pelo autor.

Para definição do valor de densidade gerou-se, pelo método do ajuste linear, duas funções que relacionam a porcentagem de metano no biogás e a densidade. A Equação (8) utiliza os valores da Tabela 2 para determinar os coeficientes da Função Densidade (FD), sendo que os valores dessa tabela são apresentados apenas por Iannicelli (2008).

$$FD_1 = 1,962586593 - (CH_4 * 0,01248267152) \quad (8)$$

Já na Equação 9, os coeficientes da FD<sub>2</sub> são definidos pelos valores da Tabela 3, os quais são apresentados por vários autores diferentes.

$$FD_2 = 1,518997778 - (CH_4 * 5,4124444 * 10^{-3}) \quad (9)$$

A Tabela 4 foi gerada por meio das funções anteriores e os valores encontrados foram então comparados:

**Tabela 4** - Comparação das funções densidade

CH <sub>4</sub>	FD <sub>1</sub>	FD <sub>2</sub>	Diferença
40%	1,463279732	1,302500018	0,160779714
50%	1,338453017	1,248375578	0,090077439
60%	1,213626301	1,194251138	0,019375164
70%	1,088799586	1,140126698	-0,051327111
80%	0,963972871	1,086002258	-0,122029387
90%	0,839146156	1,031877818	-0,192731662
99%	0,714319441	0,983165822	-0,268846381

Fonte: Elaboração própria.

Analisando a Tabela 4, pode-se observar que o valor que apresentou menor diferença entre as duas funções foi para o biogás com 60% de metano. Assim, sabendo que a concentração em torno de 60% de metano é usual para diferentes tipos de substratos, conforme medições realizadas nas unidades

de demonstração do CIBiogás, o valor de densidade do biogás a ser considerado como base padrão deve ser de 1,2039 kg.m<sup>-3</sup>, que é o valor médio entre os resultados das duas funções.

#### 4. PODER CALORÍFICO

O poder calorífico é a propriedade relacionada à quantidade de calor liberada na combustão completa da unidade de massa (ou volume) de um combustível, sendo os fumos da combustão resfriados até a temperatura do combustível (18 ou 25°C). Dessa forma, o poder calorífico de um combustível representa a quantidade de energia do material, independentemente do fato de ser ou não realizada a combustão.

A NBR 15.213 (2008), define o Poder Calorífico Superior e Inferior como:

*"Poder Calorífico Superior (PCS): quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante e com todos os produtos de combustão retornando à temperatura e pressão iniciais dos reagentes, onde toda a água formada pela reação encontra-se na forma líquida."*

*"Poder Calorífico Inferior (PCI): quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante e com todos os produtos de combustão retornando à temperatura e pressão iniciais da reagente, onde toda a água formada pela reação encontra-se na forma gasosa"*

Na Tabela 5, são apresentados os dados de equivalências de valores para conversão de algumas unidades relacionadas ao PCI para

Joule, que é a unidade do sistema internacional.

**Tabela 5** - Conversão de unidades PCI

Unidade 1	Unidade 2
1 Wh	3.600 J
1 cal	4,186 J
1 W	1 J.s <sup>-1</sup>

Fonte: Adaptado pelo autor.

O poder calorífico pode ser calculado em base molar, mássica e volumétrica, sendo que para os cálculos de energia térmica disponível é utilizado a base mássica ou volumétrica e apenas essas duas serão apresentadas neste documento. Na norma NBR 15.213 (2008), o poder calorífico para gases reais em base mássica é numericamente igual ao poder calorífico correspondente para gases ideais, assim serão apresentados apenas os equacionamentos para os gases reais.

O poder calorífico para um gás real em base mássica em uma temperatura de referência ( $T_1$ ) é calculada pela Equação (10):

$$\widehat{PC} = \sum_{j=1}^N \left( x_j \cdot \frac{M_j}{M} \cdot PC_j \right) \quad (10)$$

Onde:

$\widehat{PC}$  é o poder calorífico, superior ou inferior, ideal em base mássica;

$PC_j$  é o poder calorífico, superior ou inferior, em base mássica do componente  $j$ ;

$x_j$  é a fração molar do componente  $j$ ;

$M$  é a massa molar da mistura, calculada pela Equação (11):

$$M = \sum_{j=1}^N x_j \cdot M_j \quad (11)$$

$M_j$  é a massa molar do componente  $j$  (informações detalhadas disponíveis na Tabela B.1 – NBR 15.213-2008).

Para mais dados sobre os valores do poder calorífico para componentes dos gases combustíveis sob diferentes condições de referência de combustão e de medição para gás ideal em base volumétrica é necessário verificar a Tabela 5 da NBR 15.213-2008.

Já o poder calorífico superior e inferior para uma mistura de gases ideais em base volumétrica na temperatura de combustão  $T_1$ , medido na temperatura  $T_2$  e pressão  $p_2$ , pode ser calculado pela Equação (12):

$$\tilde{PC}_{[T_1(K),V(T_2(K),p_2)]} = \tilde{PC}_{[T_1(K)]} \cdot \frac{p_2}{R \cdot T_2(K)} \quad (12)$$

Onde:

$\tilde{PC}_i$  é o poder calorífico, superior ou inferior, do gás ideal em base volumétrica na temperatura de combustão  $T_1$ , medido na temperatura  $T_2$  e pressão  $p_2$ ;

$\tilde{PC}_i$  é o poder calorífico, superior ou inferior, do gás ideal em base molar (disponível na Tabela B.3 – NBR 15.213-2008);

$P_2$  é a pressão na condição de medição;

$T_2(K)$  é a temperatura absoluta na condição de medição;

$R$  é a constante molar dos gases.

O cálculo do poder calorífico em base volumétrica para gases reais é calculado pela Equação (13):

$$\tilde{PC}_{[T_1(K),V(T_2(K),p_2)]} = \frac{\tilde{PC}_{[T_1(K),V(T_2(K),p_2)]}}{Z_{(T,p)}} \quad (13)$$

Onde:

$\tilde{PC}$  é o poder calorífico, superior ou inferior, do gás real em base volumétrica;

$\bar{P}C_i$  é o poder calorífico, superior ou inferior, do gás ideal em base volumétrica;

$Z_{(T,P)}$  é o fator de compressibilidade do gás.

## 5. PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS

O poder calorífico do biogás varia conforme a sua composição e pode ser calculado pelos equacionamentos anteriores, entretanto em casos onde a composição exata não é conhecida, podem ser utilizados valores de referência. A Tabela 6, apresenta os valores de poder calorífico inferior referenciados por diferentes literaturas.

**Tabela 6 - Valores de PCI**

Bibliografia	Valor	Unidade	Padronização de Unidades
FNR (2010)	6	kWh.m <sup>-3</sup>	21.093,75 kJ.kg <sup>-1 a</sup>
Santos (2004)	5,339 (65% de metano)	kcal.m <sup>-3</sup>	21.814,82 kJ.kg <sup>-1 b</sup>
Souza (2006)	19.250 (63% de metano)	kJ.kg <sup>-1</sup>	19.250 kJ.kg <sup>-1</sup>
Mitzlaf (1988) e Çengel e Boles (2008)	6,1	kWh.m <sup>-3</sup>	21.445,31 kJ.kg <sup>-1 c</sup>
<b>Média</b>	-	-	<b>20.900,97 kJ.kg<sup>-1</sup></b>

Fonte: Adaptado pelo autor.

Em conformidade à Tabela 6, a média de poder calorífico do biogás está em torno de 5.100 kcal.m<sup>-3</sup>. Na Tabela 7 apresenta-se a variação no valor do PCI conforme a porcentagem de metano (CH<sub>4</sub>) no biogás em conformidade ao exposto por Avellar (2001).

<sup>a</sup> Este valor foi obtido dividindo-se o valor do PCI dividido pela densidade do biogás (1,024Kg.m<sup>-3</sup>);  
<sup>b</sup> Valor obtido multiplicando o valor do PCI em cal por 4186 para conversão para Joule e este valor dividido pela densidade

**Tabela 7 – Composição Química e PCI.**

Composição química	Poder Calorífico (kcal.kg <sup>-1</sup> )	Poder Calorífico (kJ.kg <sup>-1</sup> )
10%CH <sub>4</sub> e 90%CO <sub>2</sub>	465,43	1.948,29
40%CH <sub>4</sub> e 60%CO <sub>2</sub>	2.333,85	9.769,50
60%CH <sub>4</sub> e 40%CO <sub>2</sub>	4.229,98	17.706,70
65%CH <sub>4</sub> e 35%CO <sub>2</sub>	4.831,14	20.223,15
75%CH <sub>4</sub> e 25%CO <sub>2</sub>	6.253,01	26.175,10
95%CH <sub>4</sub> e 05%CO <sub>2</sub>	10.469,60	43.825,75
99%CH <sub>4</sub> e 01%CO <sub>2</sub>	11.661,02	48.814,03

Fonte: AVELLAR (2001).

## 6. FATOR DE COMPRESSIBILIDADE

O fator de compressibilidade de um gás é o volume real da massa desse gás, a uma dada temperatura e pressão, dividida pelo seu volume, nas mesmas condições, calculado a partir da equação do gás ideal (NBR15.213, 2008).

O fator de compressibilidade pode ser calculado pela Equação (14):

$$Z_{(T,P)} = 1 - \left[ \sum_{j=1}^N (x_j \cdot \sqrt{b_j}) \right]^2 \quad (14)$$

Onde:

$Z_{(T,P)}$  é o fator de compressibilidade do gás, nas condições de referência de temperatura e pressão;

$x_j$  é a fração molar do componente j;

$N$  é o número total de componentes;

$\sqrt{b_j}$  é o fator de adição do componente j (ver Tabela B.2 – NBR15.213-2008).

do Biogás (1,024Kg.m<sup>-3</sup>);

<sup>c</sup> Valor obtido pela divisão do PCI em kW.m<sup>-3</sup> pela densidade do Biogás (1,024 Kg.m<sup>-3</sup>).

## 7. FATOR DE COMPRESSIBILIDADE DO BIOGÁS

O fator de compressibilidade do biogás irá variar conforme a sua composição, como pode ser notado na Tabela 8, obtida a partir da Equação (14).

**Tabela 8** – Variação do fator de compressibilidade do biogás (20°C, 1 atm).

Constituintes		Fator de Compressibilidade
CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	
30%	70%	0,9958
40%	60%	0,9962
50%	50%	0,9965
60%	40%	0,9969
70%	30%	0,9972
80%	20%	0,9975
90%	10%	0,9978
97%	3%	0,9980
<b>Média</b>		<b>0,9970</b>
<b>Desvio padrão</b>		<b>0,00077</b>

Fonte: Elaboração pelo autor.

Pode-se observar que na variação de 30% até 97% de metano contido no biogás, o fator de compressibilidade variou apenas 0,00077 na média. Assim, em condições de pressão e temperatura normais (T=20°C e P=1 atm), tanto para o biogás, quanto para o biometano, pode-se utilizar o valor médio de 0,9970 garantindo resultados coerente e confiáveis.

É importante ressaltar, principalmente quando se trata de biometano, que em casos de variação de pressão e/ou temperatura mais drásticas é preciso utilizar a Equação (14) para determinar esse fator.

## 8. AGRADECIMENTOS

A presente nota é resultado do esforço empreendido pelo Centro Internacional de

Energias Renováveis – CIBiogás, suportado pela Itaipu Binacional e pela Fundação Parque Tecnológico de Itaipu – FPTI e apoiado pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FNR. **Guia Prático do Biogás – Geração e Utilização**. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe E. V. [FNR], Leipezig, 2010.

AVELLAR, L. H. N. **A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental**. *Guaratinguetá. Teses de Doutorado*. UNESP, 2001.

NBR15.213. **Gás Natural – NBR 15.213 – Cálculo de propriedades físico-químicas a partir da composição Devido**, 2008. ABNT.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 2008. 850 p.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. Taubaté: DEM/UNITAL, 2008. Dissertação mestrado.

LEMONS, M. V. D.. **USO EFICIENTE DE BIOGÁS DE ESGOTO EM MOTORES GERADORES**. 2013. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MITZLAFF, K. V.. **Engines for biogas**. Eschborn: GTZ, 1988.

OKAMURA, L. A. **AVALIAÇÃO E MELHORIA DO PODER CALORÍFICO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SANTOS, J. H. T. **Avaliação de um sistema de aquecimento do Substrato na**

**Biodigestão Anaeróbia de Dejetos Suínos.**  
Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

SEADI, T. A.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M., FINSTERWALDER, T.; VOLK, S., JANSSEN, R. **Biogas Handbook.** University Of Southern Denmark Esbjerg, 2008. 126 p.

SOUZA, R. G. **Desempenho do conjunto motogerador adaptado a biogás.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

ZACHOW, C. R. **Biogás.** 2000. 12 f. – DeTEC – Departamento de Tecnologia, UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2000.

Como citar este documento:

CIBIOGÁS. **Nota Técnica: N° 002/2018 – Características técnicas do biogás.** Foz do Iguaçu, novembro de 2018.

**Autores:**

João Carlos Christmann Zank  
Larissa Schmoeller Brandt

**Revisores:**

Jessica Yuki de Lima Mito  
Natalí Nunes Reis da Silva

**Apoio:**

João Firmino Neto  
Thiago José Lippo de França  
Rafael Hernando de Aguiar González  
Rodrigo Régis de Almeida Galvão

## APÊNDICE 2

ZANK, J.C.C., BRANDT, L.S., BEZERRA, R.C., PEREIRA, E.N. (NO PRELO). **As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis.** Revista Exacta.

Artigo apresentado e submetido para a revista Exacta – Engenharia de Produção (B2 interdisciplinar), como parte da avaliação das disciplinas de Metodologia da pesquisa Interdisciplinar e Tópicos especiais I – Estudos preliminares de produção científica, ambas concluídas no ano letivo de 2018.

O artigo apresenta as características do biogás, tanto químicas como físicas, e versa sobre o efeito das alterações de características para a intercambialidade com o gás natural segundo a lei dos gases ideais pela Equação de Clapeyron.

# As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis.

*The characteristics of biogas and evaluation of fuel substitution.*

Autor 1<sup>12</sup>

Autor 2<sup>2</sup>

Autor 3<sup>1</sup>

Autor 4<sup>1</sup>

## **Resumo**

A evolução das tecnologias e da legislação Brasileira em relação as energias renováveis, em especial solar e biogás, favoreceu o aumento no número de projetos e potência instalada nos últimos 5 anos. O conhecimento sobre as características do biogás é fundamental para realizar estimativas corretas durante a elaboração de projetos, dimensionamento de equipamentos e estudos de viabilidade técnica e financeira, bem como, analisar a intercambialidade entre combustíveis. Sendo que, a apresentação de características como densidade, poder calorífico e fator de compressibilidade, utilizando a ABNT NBR 15.213 de 2008 e informações presentes na literatura, são objetivos deste trabalho. O principal resultado apresentado é a possibilidade de intercambialidade do biogás com o gás natural.

Palavras chave: energias renováveis, biogás, fator de compressibilidade e Lei dos Gases Ideais (Equação Clapeyron).

## **Abstract**

The evolution of Brazilian technologies and legislation in relation to renewable energies, especially solar and biogas, has favored an increase in the number of projects and installed capacity in the last 5 years. Knowledge about the characteristics of biogas is essential to make accurate estimates during project design, and technical and financial feasibility studies, as well as to analyze the interchangeability between fuels. The presentation of characteristics such as density, calorific value and compressibility factor, using ABNT NBR 15.213 of 2008 and the information presented in the literature, are objectives of this work. The main result is the possibility an interchangeability of biogas with natural gas.

Keywords: renewable energy, biogas, compressibility fator and Ideal Gas Law (Clapeyron Equation)

<sup>1</sup>Instituição 1

<sup>2</sup>Instituição 2

## 1 Introdução

O planejamento energético de expansão é baseado nas informações dos planos decenais nacionais publicados pela Empresa de Pesquisa Energética [EPE] e o Ministério de Minas e Energia [MME], isso a mais de 30 anos. Visto que as concessionárias eram estatais, este servia de subsídio para investimentos e o próprio planejamento da expansão. Neste contexto, com a “desestatização” e evolução do setor elétrico, tanto na questão comercial como técnica, e a incorporação de novas fontes à matriz energética nacional, a partir de 2007 a abrangência do estudo foi ampliada, incorporando a expansão de demanda e oferta de diversos energéticos, inclusive fontes renováveis (MME & EPE, 2017).

No Plano Decenal de Expansão de Energia [PDE] 2017-2026, é preconizado que a participação das energias renováveis no balanço energético atinja o patamar de 48% ao final do horizonte decenal de planejamento. Na energia elétrica, este patamar alcançará 87%. Da expansão esperada, 11,8 GW estarão associados a energia eólica e 7 GW à solar-fotovoltaica, configurados como parques de geração conectados à rede básica para transmissão de energia elétrica. (MME & EPE, 2017).

No Brasil, a modalidade de geração distribuída foi regulamentada em 2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica [ANEEL] por meio da Resolução Normativa [REN] nº482, que instituiu o modelo de compensação no país (ANEEL, 2012). Com a publicação da REN nº687 (ANEEL, 2015), o regulamento foi aprimorado, de modo a tornar o processo de conexão mais célere e ampliar o acesso à geração distribuída para um número maior de unidades consumidoras. Atualmente, a resolução permite a conexão de geradores de até 5 MW na rede de distribuição, a partir de fontes renováveis de energia ou cogeração qualificada (MME & EPE, 2017).

Com a REN 482/2012 (ANEEL, 2012) a geração própria teve seu início, e começou a se popularizar. Em 2016 houve um crescimento de mais de quatro vezes no número de instalações, terminando o ano com 81 MW instalados, distribuídos em 7,7 mil unidades (ANEEL, 2017). Apesar do crescimento recente, essa modalidade ainda possui um grande potencial inexplorado no Brasil, havendo espaço para se desenvolver muito mais na próxima década.

Dentre as tecnologias de geração distribuída de pequeno porte, destaca-se a baseada no aproveitamento solar fotovoltaico. Essa tecnologia se apresenta com maior potencial de penetração no horizonte decenal, em razão da sua modularidade e custo decrescente.

Contudo, considerando o exposto no relatório da *Food and Agriculture Organizations of United Nations*, Organização das Nações Unidas para Alimento e Agricultura [FAO] e *Organization for Economic Cooperation and Development* Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OECD em 2018, o Brasil caminha para tornar-se líder mundial em produção de soja, milho, biocombustível e proteína animal. O relatório considera que a expansão da área agricultável e aumento da eficiência para produção agrícola sejam os principais motivos para tal indicação nos próximos 10 anos.

No contexto de expansão da produção de proteína animal e biocombustível, associa-se o crescimento da demanda energética, visto a utilização de processos automatizados nestas cadeias produtivas, buscando eficiência e ganho de escala na produção. Com este crescimento, a produção de resíduos orgânicos, como dejetos animais e rejeitos de processos produtivos será elevada e proporcional.

Conforme definido por (Budzianowski et al., 2017), o biogás é um combustível renovável e sustentável, derivado da digestão anaeróbia da biomassa e elegível para substituição do gás natural. Dessa forma, o saneamento ambiental associado à produção de energia é uma saída sustentável para apoiar esta evolução na produção sendo que, o conhecimento sobre projetos e a escolha correta de equipamentos para uso energético do biogás são cruciais para que esta fonte alcance o potencial esperado.

Considerando as informações apresentadas por FAO e OECD (2018), associados às do MME e EPE (2017), percebe-se que as energias renováveis, e neste contexto o biogás, terão papel estratégico no desenvolvimento da capacidade produtiva do Brasil.

A equivalência energética do biogás com outros combustíveis, a adequação de equipamentos que utilizam outros combustíveis para operar com biogás, e o projeto de equipamentos que utilizarão o biogás como fonte energética, requerem um profundo conhecimento das características do combustível, para tal, o objetivo deste artigo é apresentar as características do biogás e sua intercambialidade com o gás natural, por meio da equação dos gases ideais. Para isso serão apresentados os valores comumente encontrados na literatura e normas existentes para as características e o equacionamento de gases combustíveis. E, com estas informações apresentar-se-á a hipótese para análise de substituição e intercambialidade entre biogás e gás natural utilizando a equação dos gases ideais de Clapeyron.

## 2 Referencial Teórico

O referencial teórico é desenvolvido a partir do objetivo do estudo. A próxima seção trata do equacionamento para o biogás em relação à densidade, para então tratar de poder calorífico e do fator de compressibilidade nas seções seguintes, o que norteia a possibilidade de uso da lei dos gases ideais em cálculos com biogás. Todas as características do biogás são discutidas considerando as informações obtidas em literatura e na norma ABNT NBR 15.213 de 2008.

### 2.1 Conceito e equacionamento conforme ABNT NBR 15.213:2008

A norma ABNT NBR15.213 (2008) é um documento que fixa os requisitos exigíveis para calcular o poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de Wobbe para o gás natural e outros combustíveis gasosos, em várias condições de referência. Sabendo que, o biogás bruto se enquadra como um combustível gasoso, será utilizada essa norma como base para definição e determinação das propriedades relacionadas à energia do biogás.

#### 2.1.1. Conceito e equacionamento

Conforme definido na norma ABNT NBR15.213 (2008) a densidade absoluta é a quantidade de massa por unidade de volume do gás a uma dada pressão e temperatura. Essa relação é determinada pelo tamanho, peso dos átomos e tipo de ligação química. Já a densidade relativa, ainda segundo a norma, é a relação entre a densidade absoluta de um gás e a densidade absoluta do ar seco com composição padronizada, nas mesmas condições de temperatura e pressão. A densidade absoluta de um gás real depende da temperatura  $T$  e pressão  $p$ , e calcula-se pela Equação (1):

$$\rho_{(T,p)} = \frac{\rho_{i(T,p)}}{Z_{mis(T,p)}} \quad (1)$$

Onde:

$\rho_{(T,p)}$  é a densidade absoluta do gás real;

$\rho_{i(T,p)}$  é a densidade absoluta do gás ideal;

$Z_{mis(T,p)}$  é o fator de compressibilidade do gás no estado de referência.

Já a densidade absoluta do gás ideal também é dependente da temperatura e pressão, conforme apresenta-se na Equação (2):

$$\rho_{i(T,p)} = \left( \frac{p}{R \cdot T(K)} \right) \sum_{j=1}^N (x_j \cdot M_j) \quad (2)$$

Onde:

$\rho_{i(T,p)}$  é a densidade absoluta do gás ideal;

$T(K)$  é a temperatura absoluta;

$R$  é a constante molar dos gases;

$x_j$  é a fração molar do componente  $j$ ;

$p$  é a pressão absoluta;

$M_j$  é a massa molar do componente  $j$ .

A densidade relativa de um gás real a uma dada temperatura e pressão é calculada pela Equação (3):

$$d_{(T,p)} = d_i \frac{Z_{ar(T,p)}}{Z_{mis(T,p)}} \quad (3)$$

Onde:

$d_{(T,p)}$  é a densidade relativa do gás real;

$d_i$  é a densidade relativa do gás ideal;

$Z_{ar(T,p)}$  é o fator de compressibilidade do ar seco no estado de referência;

$Z_{mis(T,p)}$  é o fator de compressibilidade do gás no estado de referência.

O conceito do fator de compressibilidade e o fator de compressibilidade do biogás serão discutidos e equacionados no tópico 5 e 6, respectivamente. Para o ar, valores comumente utilizados são:

$$T=0^\circ\text{C}, \quad Z_{ar(273,15\text{K},101,325\text{kPa})} = 0,99941$$

P=1 atm

$$T=15^\circ\text{C}, \quad Z_{ar(288,15\text{K},101,325\text{kPa})} = 0,99958$$

P=1 atm

$$T=20^\circ\text{C}, \quad Z_{ar(293,15\text{K},101,325\text{kPa})} = 0,99963$$

P=1 atm

E a densidade relativa do gás ideal é independente de qualquer estado de referência, sendo calculada pela Equação (4):

$$d_i = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \frac{M_j}{M_{ar}} \quad (4)$$

Onde:

$d_i$  é a densidade relativa do gás ideal;

$N$  é o número total de componentes;

$x_j$  é a fração molar do componente  $j$ ;

$M_j$  é a massa molar do componente  $j$ ;

$M_{ar}$  é a massa molar do ar de composição padrão.

## 2.2 Densidade do biogás

O biogás é um gás incolor e em alguns casos inodoro, dependendo da composição. A composição típica da mistura gasosa que forma o biogás, é apresentada na Tabela 1.

*Tabela 1 - Composição química do biogás*

Composto	Porcentagem na Mistura Gasosa (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 a 75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 a 40
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	1 a 3
Azoto (N <sub>2</sub> )	0.5 a 2.5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0.1 a 1
Gás Sulfúrico (H <sub>2</sub> S)	0.1 a 0.5
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	0.1 a 0.5
Monóxido de Carbono (CO)	0 a 0.1
Água (H <sub>2</sub> O)	Variável

Fonte: Adaptado de (Zachow, 2000).

A densidade do biogás, quando é conhecida sua composição, pode ser determinada pelos equacionamentos apresentados anteriormente e previstos em norma técnica. Ou ainda, pode-se utilizar valores padronizados já fundamentados por diversas bibliografias, como será apresentado nas Tabelas 2 e 3. O biogás é um gás leve e de fraca densidade. Mais leve do que o ar, essa fraca densidade faz com que ele ocupe um volume significativo e que a sua liquefação seja mais difícil, o que implica em desvantagens em termos de transporte, armazenamento e utilização conforme Tabela 2, (Iannicelli, 2008).

*Tabela 2 - Densidade do biogás conforme a concentração de metano*

Composição química	Densidade
10% CH <sub>4</sub> e 90% CO <sub>2</sub>	1,8393
40% CH <sub>4</sub> e 60% CO <sub>2</sub>	1,4600
60% CH <sub>4</sub> e 40% CO <sub>2</sub>	1,2143
65% CH <sub>4</sub> e 35% CO <sub>2</sub>	1,1518

Composição química	Densidade
75% CH <sub>4</sub> e 25% CO <sub>2</sub>	1,0268
95% CH <sub>4</sub> e 05% CO <sub>2</sub>	0,7768
99% CH <sub>4</sub> e 01% CO <sub>2</sub>	0,7268

Fonte: (Iannicelli, 2008).

*Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe*, do alemão, Agência de Recursos Renováveis [FNR] (2013) diz que o biogás apresenta uma densidade de 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Já (Seadi et al., 2008), considera o biogás com 50% de metano e densidade de 1,22 kg/m<sup>3</sup>. O autor (Lemos, 2013), apresenta a densidade relativa de biogás proveniente de esgoto com 67,5% de metano igual a 0,8148 m<sup>3</sup>/kg, ou seja, uma densidade igual à 1,2273 kg/m<sup>3</sup>. E, temos o autor (Okamura, 2013) que faz uma comparação entre a densidade do biogás proveniente de aterros sanitário, no qual resulta 45% de metano e de biogás proveniente de biodigestores com 65% de metano, sendo de 1,3 kg/m<sup>3</sup> e 1,1 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Considerando as bibliografias consultadas/pesquisadas, pode-se elaborar a Tabela 3, que apresenta a relação encontrada pelos autores entre a densidade e a porcentagem de Metano no biogás.

Tabela 3 - Valores de densidade em relação ao percentual de metano no biogás, referenciados com as pesquisas.

Autor	Porcentagem de CH <sub>4</sub>	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]
Okamura (2013)	45%	1,3
Seadi et al. (2008)	50%	1,22
Iannicelli (2008)	60%	1,2143
Iannicelli (2008)	65%	1,1518
Okamura (2013)	65%	1,1
Lemos (2013)	67,5%	1,2273
FNR (2013)	-	1,2
<b>Média</b>	<b>58,75</b>	<b>1,2022</b>

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Para definição do valor de densidade padrão, utilizando o método do ajuste linear, gerou-se duas funções, que relacionam a porcentagem de metano no biogás e a densidade. Na Equação (5), utiliza-se os valores da Tabela 2 para determinar os coeficientes da Função Densidade (FD), sendo que os valores dessa tabela são apresentados apenas por (Iannicelli, 2008).

$$FD_1 = 1,962586593 - (CH_4 * 0,01248267152) \quad (5)$$

Já na Equação (6), os coeficientes da FD2 são definidos pelos valores da Tabela 3, os quais são apresentados por vários autores diferentes.

$$FD_2 = 1,518997778 - (CH_4 * 5,4124444 * 10^{-3}) \quad (6)$$

A Tabela 4 foi elaborada por meio das funções anteriores e os valores encontrados foram então comparados:

Tabela 4 - Comparação das funções densidade

CH <sub>4</sub>	FD <sub>1</sub>	FD <sub>2</sub>	Diferença
40%	1,4632797322	1,302500018	0,160779714

CH <sub>4</sub>	FD <sub>1</sub>	FD <sub>2</sub>	Diferença
50%	1,338453017	1,248375578	0,090077439
60%	1,2136263018	1,194251138	0,019375164
70%	1,0887995866	1,140126698	-0,051327111
80%	0,9639728714	1,086002258	-0,122029387
90%	0,8391461562	1,031877818	-0,192731662
99%	0,714319441	0,983165822	-0,268846381

Fonte: Próprio Autor.

Analisando a Tabela 4, pode-se observar que o valor que apresentou a menor diferença entre as duas funções foi para biogás com 60% de metano, sendo este valor comum, conforme apresentado nas literaturas da Tabela 3 e próximo da média. Dessa forma, o valor de densidade do biogás a ser considerado como base padrão deve ser de 1,2039 kg/m<sup>3</sup>, que é o valor médio entre os resultados das duas funções.

### 2.3 Poder Calorífico

O poder calorífico é a propriedade relacionada à quantidade de calor liberada na combustão completa da unidade de massa (ou volume) de um combustível, sendo os fumos da combustão resfriados até a temperatura do combustível (18 ou 25°C). Dessa forma, o poder calorífico de um combustível representa a quantidade de energia do material, independentemente do fato de ser ou não realizada a combustão.

A ABNT NBR 15.213 (2008), define o Poder Calorífico Superior e Inferior como:

Poder Calorífico Superior (PCS): quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante e com todos os produtos de combustão retornando à temperatura e pressão iniciais dos reagentes, onde toda a água formada pela reação encontra-se na forma líquida.

Poder Calorífico Inferior (PCI): quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de gás com o ar, à pressão constante e com todos os produtos de combustão retornando à temperatura e pressão iniciais da reagente, onde toda a água formada pela reação encontra-se na forma gasosa. (ABNT NBR 15213, 2008, p. 4)

Na Tabela 5, apresenta-se as equivalências de valores para conversão de algumas unidades relacionadas ao PCI para Joule, que é a unidade do sistema internacional.

*Tabela 5 - Conversão de unidades PCI*

1Wh	3600J
1 cal	4,186 J
1W	1J/s

Fonte: Próprio Autor.

O poder calorífico pode ser calculado em base molar, mássica e volumétrica, sendo que para os cálculos de energia térmica disponível é utilizado a base mássica ou volumétrica e apenas essas duas serão apresentadas neste artigo. Na norma ABNT NBR 15.213 (2008), o poder calorífico para gases reais em base mássica é numericamente igual ao poder calorífico correspondente para gases ideais, assim serão apresentados apenas os equacionamentos para os gases reais.

O poder calorífico para um gás real em base mássica em uma temperatura T1 (ver Tabela 5: Valores do poder calorífico para componentes dos gases combustíveis sob diferentes condições de referência de combustão e de medição para gás ideal em base volumétrica – ABNT NBR 15.213-2008) é calculada pela Equação (7):

$$\bar{P}\hat{C} = \sum_{j=1}^N \left( x_j \cdot \frac{M_j}{M} \cdot P\hat{C}_j \right) \quad (7)$$

Onde:

$\bar{P}\hat{C}$  é o poder calorífico, superior ou inferior, ideal em base mássica;

$P\hat{C}_j$  é o poder calorífico, superior ou inferior, em base mássica do componente j;

$x_j$  é a fração molar do componente j;

$M$  é a massa molar da mistura, calculada pela Equação (8):

$$M = \sum_{j=1}^N x_j \cdot M_j \quad (8)$$

$M_j$  é a massa molar do componente j (Tabela B.1 – ABNT NBR 15.213-2008).

O poder calorífico superior e inferior para uma mistura de gases ideais em base volumétrica na temperatura de combustão T1, medido na temperatura T2 e pressão p2, é calculada pela Equação (9):

$$\check{P}C_{i[T_1(K),V(T_2(K),p_2)]} = \bar{P}C_{i[T_1(K)]} \cdot \frac{p_2}{R \cdot T_2(K)} \quad (9)$$

Onde:

$\check{P}C_i$  é o poder calorífico, superior ou inferior, do gás ideal em base volumétrica na temperatura de combustão T1, medido na temperatura T2 e pressão p2;

$\bar{P}C_i$  é o poder calorífico, superior ou inferior, do gás ideal em base molar (Tabela B.3 – ABNT NBR 15.213-2008);

$p_2$  é a pressão na condição de medição;

$T_2(K)$  é a temperatura absoluta na condição de medição;

$R$  é a constante molar dos gases.

O cálculo do poder calorífico em base volumétrica para gases reais é calculado pela Equação (10):

$$\check{P}C_{i[T_1(K),V(T_2(K),p_2)]} = \frac{\bar{P}C_{i[T_1(K),V(T_2(K),p_2)]}}{Z_{(T,p)}} \quad (10)$$

Onde:

$\check{P}C$  é o poder calorífico, superior ou inferior, do gás real em base volumétrica;

$\tilde{P}C_i$  é o poder calorífico, superior ou inferior, do gás ideal em base volumétrica;

$Z_{(T,p)}$  é o fator de compressibilidade do gás.

## 2.4 Poder Calorífico do Biogás

O poder calorífico do biogás apresentará variação conforme a sua composição e concentração de diferentes gases, e este pode ser calculado pelos equacionamentos anteriores, entretanto, em casos onde a composição exata não é conhecida, podem ser utilizados valores de referência.

Na Tabela 6, apresenta-se os valores de poder calorífico inferior em diferentes referenciais bibliográficos.

Tabela 6 - Valores de PCI para o biogás encontrados na literatura

Bibliografia	Valor	Unidade	Padronização de Unidades
FNR (2013)	6	kWh/m <sup>3</sup> .h	21093,75 kJ/kg. <sup>6</sup>
Santos (2004)	5,339 (65% de metano)	kcal/m <sup>3</sup>	21814,82 kJ/kg <sup>7</sup>
Souza (2006)	19250 (63% de metano)	kJ/kg	19250 kJ/kg
Mitzlaf (1988) e Çengel e Boles (2008)	6,1	kWh/m <sup>3</sup>	21445,31 kJ/kg.s <sup>8</sup>
<b>Média</b>			<b>20900,97 kJ/kg</b>

Fonte: Adaptado pelo Autor.

Na Tabela 7, apresenta-se a variação no valor do PCI conforme a porcentagem de Metano (CH<sub>4</sub>) no biogás em conformidade à (Avellar, 2001).

Tabela 7 – Composição Química e PCI

Composição química	Poder Calorífico (kcal/kg)	Poder Calorífico (kJ/kg)
10% CH <sub>4</sub> e 90% CO <sub>2</sub>	465,43	1948,29
40% CH <sub>4</sub> e 60% CO <sub>2</sub>	2333,85	9769,50
60% CH <sub>4</sub> e 40% CO <sub>2</sub>	4229,98	17706,70
65% CH <sub>4</sub> e 35% CO <sub>2</sub>	4831,14	20223,15
75% CH <sub>4</sub> e 25% CO <sub>2</sub>	6253,01	26175,10
95% CH <sub>4</sub> e 05% CO <sub>2</sub>	10469,60	43825,75
99% CH <sub>4</sub> e 01% CO <sub>2</sub>	11661,02	48814,03

<sup>6</sup> Este valor foi obtido dividindo-se o valor do PCI dividido pela densidade do biogás (1,024Kg/m<sup>3</sup>)

<sup>7</sup> Valor obtido multiplicando o valor do PCI em cal por 4186 para conversão para Joule e este valor dividido pela densidade do biogás (1,024Kg/m<sup>3</sup>)

<sup>8</sup> Valor obtido pela divisão do PCI em kW/m<sup>3</sup> pela densidade do biogás (1,024 Kg/m<sup>3</sup>)

Fonte: (Avellar, 2001).

## 2.5 Fator de Compressibilidade

O fator de compressibilidade de um gás é o volume real da massa desse gás, a uma dada temperatura e pressão, dividida pelo seu volume, nas mesmas condições, calculado a partir da equação do gás ideal (ABNT NBR 15.213, 2008).

O fator de compressibilidade pode ser calculado pela Equação (11):

$$Z_{(T,p)} = 1 - \left[ \sum_{j=1}^N (x_j \cdot \sqrt{b_j}) \right]^2 \quad (11)$$

Onde:

$Z_{(T,p)}$  é o fator de compressibilidade do gás, nas condições de referência de temperatura e pressão;

$x_j$  é a fração molar do componente j;

N é o número total de componentes;

$\sqrt{b_j}$  é o fator de adição do componente j (ver Tabela B.2 – ABNT NBR 15.213-2008).

## 2.6 Fator de Compressibilidade Biogás

O fator de compressibilidade do biogás irá variar conforme a sua composição, como pode ser visto na Tabela 8, a qual foi construída utilizando a Equação (11).

Tabela 8: Variação do fator de compressibilidade do biogás (20°C, 1 atm)

Constituintes		Fator de Compressibilidade
CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	
30%	70%	0,9958
40%	60%	0,9962
50%	50%	0,9965
60%	40%	0,9969
70%	30%	0,9972
80%	20%	0,9975
90%	10%	0,9978
97%	3%	0,9980
<b>Média</b>		<b>0,9970</b>
<b>Desvio padrão</b>		<b>0,00077</b>

Fonte: Próprio Autor.

Pode-se observar que na variação de 30 a 97% de metano no biogás o fator de compressibilidade variou apenas 0,00077 na média. Pode-se concluir que, em condições de pressão e temperatura normais (T=20°C e P =1 atm), tanto para o biogás, quanto para o biometano, pode-se utilizar o valor médio de 0,9970 garantindo resultados coerente e confiáveis.

## 3 Lei dos Gases Reais e Ideais

A observação das características do biogás apresentada na seção anterior, quando balizada em relação as variáveis termodinâmicas descritas nas leis dos gases reais e ideais, permite a comparação entre gases combustíveis. A lei dos gases reais considera o ajuste da equação Clapeyron como descrito por (Sabin, Prestes, Martins, Adaime e Zanella, 2011) pelo fator de compressibilidade do gás. Sendo a Equação (12), representativa para este conceito.

$$P \cdot V = Z_{(T,p)} \cdot n \cdot R \cdot T \quad (12)$$

Onde:

$P$  é a pressão do gás, kgf/cm<sup>2</sup>;

$V$  é o volume ocupado pelo gás, m<sup>3</sup>;

$Z_{(T,p)}$  é o fator de compressibilidade;

$n$  é o número de moles do gás, kg mol;

$R$  é a constante universal dos gases, 0,0848 kgf;

$T$  é a temperatura absoluta do gás na escala kelvin;

O fator de compressibilidade do biogás apresentado, ( $Z_{(T,p)} = 0,9970$ ) próximo de 1 (um), indica a possibilidade de utilização da lei dos gases ideais, sem prejuízos significativos quando da substituição hipotética entre gases combustíveis que também possuam fator de compressibilidade unitário, dentre eles o gás natural (BEGGS, 1984).

Quanto a lei dos gases ideais, conforme descrito por (Sabin et al, 2011),

a lei de Charles estabelece que, sob pressão constante, o volume de uma quantidade constante de gás aumenta proporcionalmente com a temperatura. A lei de Boyle-Mariotte estabelece que, sob transformação isotérmica, o produto entre pressão e volume é constante; e Gay-Lussac afirma que, sob um volume e quantidade de gás constantes, a pressão é diretamente proporcional à temperatura. Por fim, Avogadro acrescenta que o aumento do número de partículas implica no aumento do número de colisões e um igual número de partículas para gases diferentes implica em um igual número de colisões. Assim, as leis de Charles, Boyle-Mariotte Gay-Lussac e Avogadro podem ser expressas pela equação de estado de Clapeyron. (Sabin et al, 2011, p.415),

A Equação que reúne as leis descritas acima é a 13.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (13)$$

Onde:

$P$  é a pressão do gás, kgf/cm<sup>2</sup>;

$V$  é o volume ocupado pelo gás, m<sup>3</sup>;

$n$  é o número de moles do gás, kg mol;

$R$  é a constante universal dos gases, 0,0848 kgf;

$T$  é a temperatura absoluta do gás na escala kelvin;

Considerando que o biogás obedece a Lei dos Gases Ideais, há disponível um rol de equações para dimensionamento de vasos de pressão, utilizados em sua maioria para gás natural, e que pode ser utilizado no dimensionamento de tubulações, queimadores e gasômetros para biogás, sendo possível ainda a calibração de equipamentos de medição e monitoramento, visto que equipamentos utilizados para medir vazão e pressão com gás natural podem ser utilizados e aferidos para biogás com grande precisão.

#### **4 Conclusão**

A possibilidade de comparar gases sob uma mesma base ou método, é útil quando falamos da substituição de combustíveis e insumos energéticos, seja em unidades geradoras, caldeiras ou mesmo fogões e veículos. Permite-se neste contexto, comparar equipamentos em relação a sua eficiência para produção de energia elétrica, térmica e veicular, bem como, realizar o dimensionamento dos equipamentos e seu estudo de viabilidade para aplicação e substituição de combustíveis.

Conforme apresentado em outros trabalhos, (Silva, 2013; Felipe, 2009; Halmeman et al., 2014; Budzianowski et al., 2017) o uso do biogás como substituto do gás natural é promissor, contudo, o biogás gerado por meio da digestão anaeróbica possui outras características as serem consideradas, como indicado por (Budzianowski et. al., 2017), o biogás gerado está naturalmente em baixa pressão, possui baixa gravidade específica e alto volume específico, sendo desafiador seu armazenamento com fins energéticos, pois sua proporção de Dióxido de Carbono, reduz seu poder calorífico, velocidade de chama e limites de inflamabilidade, se comparado ao gás natural. Apesar destas dificuldades, seu uso como fonte renovável de energia, por muitas vezes substituindo o gás natural é reconhecido como estratégico na matriz energética dos países (FNR, 2013; Santos et al., 2015).

Considerando os valores apresentados na Tabela 1, para composição química do biogás (Zachow, 2000), e a conclusão de que o biogás permanece com seu fator de compressibilidade muito próximo a um (1), desde concentrações de 30% até 97% de Metano, comprovou-se a hipótese da possibilidade de intercambialidade do biogás com o gás natural com a utilização da Lei dos Gases Ideais. A relevância desta comprovação é útil no dimensionamento de equipamentos para uso energético e vasos de pressão, como: tubos, conexões, válvulas de manobra, reservatórios e máquinas para compressão e transporte do biogás, visto o aproveitamento da literatura e equações desenvolvidas para gás natural.

#### **5 Referências Bibliográficas**

ABNT NBR 15213:2008. Gás Natural – *Cálculo de propriedades físico-químicas a partir da composição Devido*. 2008. ABNT.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução Normativa nº482*. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 29 set. 2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução Normativa nº687*. 2015.

Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 29 set.2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Banco de Informações da Geração (BIG)*. 2017 Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 17 dez. 2017.

Avellar, L. H. N. (2001) *A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental*. Teses de Doutorado - UNESP. Guaratinguetá, SP.

Beegs, H. D. (1984) *Gas Production Operations*, Tulsa OK: OGCI Publications.

Budzianowski, W. M. et al. (2017) Power Requirements of biogas upgrading by water scrubbing and biomethane compression: Comparative analysis of various plant configurations. *Energy Conversion and Management*, v. 141, p. 2-19.

Çengel, Y. A.; & Boles, M. A. (2008) *Termodinâmica*. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill.

FNR. Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. (BMELV) (Ed.). *Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização*. 5. ed. Gülzow-prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe E. V. (2013) (FNR). ALEMANHA. P. 236.

Halmeman, M.C.R. et al. (2014) The Deployment of biodigester systems in rural properties. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 8, n. 4, p. 351-360.

Ianniceli, L. A. (2008) *Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira*. Taubaté: DEM/UNITAL, Dissertação mestrado.

Lemos, M. V. D. (2013) *Uso eficiente de biogás de esgoto em motores geradores*. 2013. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MME & EPE. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (2017). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética*. Brasília, DF: MME/EPE.

Mitzlaf, K. V.(1988) *Engines for biogas*. Eschborn: GTZ.

OECD & FAO. Food and Agriculture Organizations of United Nations, & Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (2018). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2018-2027*. OECD Publishing, Paris / Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Disponível em: [https://doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2018-en](https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2018-en). Acesso em 28 set. 2018.

Okamura, L. A. (2013) *Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de*

*resíduos sólidos urbanos*. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

Sabin, G. P., Prestes, O. D., Martins, M. L., Adaime, M. B., & Zanella, R. (2011) *Aumento da resposta analítica por meio da otimização do sistema de injeção em cromatografia gasosa empregando a lei dos gases ideais*. Química Nova. Vol. 34, No. 3, 414-418.

Santos, J. H. T. (2004) *Avaliação de um sistema de aquecimento do Substrato na Biodigestão Anaeróbia de Dejetos Suínos*. 2004. 82 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG.

Santos, J.T.S. et al.(2015) Estimativa da viabilidade de produção de biogás a partir do efluente de indústrias de laticínios no estado de Sergipe utilizando modelagem e simulação. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 229-237.

Seadi, T. (2013) *Biogas Handbook*. Esbjerg: University of Southern Denmark. Esbjerg.

Silva, A.R.B.(2013) *Tratamento de efluentes na indústria de laticínios*. 2013. 26 f. Monografia (Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG.

Souza, R. G. (2006) *Desempenho do conjunto motogerador adaptado a biogás*. 2006. 40 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG.

Zachow, C. R. (2000) *Biogás*. 2000. 12 f. – DeTEC – Departamento de Tecnologia, UNIJUI - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí/RS.

Zhang, C. et al. (2014) Reviewing the anerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 383-392.