

Este documento é um produto do Programa de Energia para o Brasil (BEP) do governo britânico e executado por um consórcio de organizações liderado pela *Adam Smith International* (ASI) e com a participação do Instituto 17 (i17), *Carbon Limiting Technologies* (CLT), hubz e Fundação Getúlio Vargas (FGV).

Para mais informações, acesse:

<https://www.ukbrep.org/pt/home> e <http://i17.org/>



Adam Smith
International



CLT CARBON
LIMITING
TECHNOLOGIES



FGV

EQUIPE TÉCNICA PROGRAMA DE ENERGIA PARA O BRASIL:

Diretores de Programa: Zane Kanderian (ASI) / Gilberto de Martino Jannuzzi (ASI)

Gerentes de Programa: Louise Hill (FCDO-UK) / Fernanda Guedes (ASI)

Conselheira Estratégica: Elbia Gannoum (ASI)

Coordenação Técnica: Alessandro Sanches Pereira (i17)

Líder em Aproveitamento Energético de Resíduos: Leidiane Ferronato Mariani (i17)

Líder da equipe: Vanice Helen Nakano (i17)

Responsável técnico: Gladis Maria Backes Bühring (i17)

Equipe técnica do i17: André Cestonaro do Amaral, Brenda Monteiro Rodrigues, Deisi Cristina Tapparo, Izabelly Cassia May, Jessica Yuki de Lima Mito, Luiz Gustavo Silva de Oliveira, Maria Eduarda Cação Rosa, Vinicius Fritsch, Jorge Vinicius

Neto, Rodrigo Bins, Paulo Eichler, Marcelo Zamberlan, Rael Mairesse

Revisoras do ASI: Luiza Bazan (Gerente de Monitoramento e Avaliação),

Suzanne Maia (Conselheira em Inclusão Social e Igualdade de Gênero)

e Marta Telles (Gerente de Comunicação e Inclusão)

Revisora editorial: Claudete Debértolis Ribeiro

Projeto gráfico e editoração: TXT Conteúdo e **dad**esign

Informações Legais

- Essa publicação está sob a licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional \(CC BY 4.0\)](#).
- Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelos autores. Nem Instituto 17 ou os autores podem ser responsabilizados por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo direto ou indireto resultante do uso ou confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo, ou direta ou indiretamente resultante de eventuais erros, imprecisões ou omissões de informações nele presentes.
- A duplicação ou reprodução de todo ou partes do estudo (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que o Instituto 17 seja citado como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento escrito do Instituto 17.

Ficha catalográfica:

Instituto 17

Biogás no Brasil: Análise de viabilidade econômica e de potencial de investimentos. Programa de Energia para o Brasil – BEP (Brasil). Relatório técnico 02-2022. São Paulo/SP: Instituto 17, 2022.

Biogas in Brazil: economic feasibility analysis and investment potential. Brazil Energy Programme – BEP (Brazil). Technical report 02-2022. São Paulo: Instituto 17, 2022.

108 p. il. color.

ISBN 978-65-997883-9-0

1. Energia. 2. Viabilidade econômica. 3. Biogás. 4. Transição energética.
5. Investimentos. 6. Mudanças climáticas. 7. Desenvolvimento sustentável.



PREFÁCIO

Em resposta aos desafios gerados pelas mudanças climáticas, muitos países vêm construindo narrativas que têm evidenciado que as implicações destes podem ser traduzidas em termos de oportunidades, riscos e benefícios, tendo, como base, as prioridades e as condições internas de cada território. Dentre as múltiplas perspectivas que se tem vislumbrado, nesse sentido, a transição energética para uma economia inclusiva de baixo carbono é um recurso que se destaca e desponta como consenso.

O Programa de Energia para o Brasil (BEP) insere-se como uma contribuição valiosa no contexto de uma iniciativa coletiva ampla, pois envolve várias instituições e atores, cujo objetivo comum é propiciar a evolução da governança e da qualidade das informações disponíveis sobre transição energética, em um ambiente em que o aproveitamento energético de resíduos é fator fundamental para o sucesso da estratégia de desenvolvimento nacional, de forma sustentável.

A realização da parceria Brasil-Reino Unido, por meio do BEP, possibilitou uma troca de conhecimentos e experiências sobre o uso do biogás produzido a partir do aproveitamento energético de resíduos, os quais são apresentados na série “BIOGÁS NO BRASIL”, em cinco volumes. Nesse contexto, o BEP assume papel relevante como indutor do desenvolvimento de informações nacionais para o aproveitamento do biogás, o que possibilita um retorno positivo para o setor energético do Brasil, em função do potencial de incremento para a viabilidade técnica e econômica das plantas e instalações de aproveitamento energético de resíduos.

O BEP, que a EPE se orgulha por ter apoiado, constitui o início de uma jornada da maior relevância para que o Brasil possa ser protagonista no contexto da transformação energética nacional para uma economia inclusiva de baixo carbono. Considero de alta relevância o engajamento e a articulação institucional do MME, EPE, ANP, ANEEL e MAPA, além de outras entidades públicas, nesse processo. Cada uma dessas instituições trabalha no âmbito de suas competências, mas dialoga abertamente com as demais, incluindo o setor privado, e foi essa sinergia que permitiu ao BEP constituir-se como um projeto bem-sucedido em fazer avançar uma maior integração e compreensão dos dados sobre energias limpas ou sustentáveis, especialmente, sobre biogás.

Thiago Barral

Presidente

Empresa de Pesquisa Energética



APRESENTAÇÃO

Como parte do apoio do Programa de Energia para o Brasil (BEP) do governo britânico ao processo de transição energética do Brasil para uma economia inclusiva de baixo carbono, a frente de Aproveitamento Energético de Resíduos (*Waste to Energy*), liderada pelo Instituto 17, tem avançado na contribuição ao desenvolvimento do setor. O BEP é implementado pelo consórcio liderado pela *Adam Smith International*, em parceria com o Instituto 17, *Carbon Limiting Technologies*, hubz e Fundação Getúlio Vargas.

Ao longo do primeiro ano de implementação do BEP (julho/2020 a julho/2021), foi dado um enfoque especial ao estudo e proposições para o setor de biogás do país. Dentre os resultados obtidos estão:

1. Estimativa do potencial de biogás do Brasil, a curto prazo, para pecuária, indústria e saneamento.
2. Geração de indicadores ambientais e sociais do setor baseados em casos reais, com base na metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida Ambiental.
3. Geração de indicadores econômicos de casos de biogás baseados em dados reais, com base na metodologia de análise de viabilidade econômica.
4. Criação e aplicação de metodologia multicritério para análise e definição de modelos de negócio para o desenvolvimento sustentável.
5. Análise de barreiras ao desenvolvimento do setor de biogás, validação por meio de pesquisa de opinião com atores do setor e proposição de possíveis meios para superação das barreiras levantadas.
6. Desenvolvimento de *White Paper* e Análise de Impacto Regulatório para a regulação de biometano no nível estadual.

Esta publicação apresenta os resultados econômicos de casos com produção de biogás baseados em empreendimentos não reais, mas que partem de exemplos de possíveis configurações de modelos que refletem a viabilidade teórica do negócio, mediante as diversas premissas e considerações adotadas. A especificidade de cada projeto (arranjo tecnológico, eficiência de processo, localidade, gestão do negócio etc.) são fatores determinantes para essa viabilidade.

O conteúdo desta publicação técnica objetiva disponibilizar definições estratégicas e direcionar o setor de Aproveitamento Energético de Resíduos para a produção e uso energético do biogás, portanto, voltado, principalmente, a tomadores de decisões públicos, reguladores, investidores, pesquisadores e produtores.



AGRADECIMENTOS

As instituições partes do consórcio de implementação do Programa de Energia para o Brasil (BEP): Adam Smith International, Carbon Limiting Technologies, hubz e Fundação Getúlio Vargas e, em especial, o Instituto 17, responsável pela execução do componente de Aproveitamento Energético de Resíduos do BEP, agradecem ao governo do Reino Unido pelo financiamento e confiança na execução do Programa.

Também estendem o agradecimento às instituições que apoiaram a elaboração desse estudo: 3DI Engenharia, Associação Brasileira de Biogás (ABiogás), AUMA Energia, Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás (CIBiogás), CHP Brasil, Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), Enermac Soluções com Energia, Fazenda Vale do Jotuva, GEF Biogás Brasil, projeto liderado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), implementado pela Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO) e tendo como Comitê Diretor do Projeto o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), Itaipu Binacional, Ministério de Minas e Energia (MME), Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Grupo Cocal, Grupo IGÁS, GW Energia, NovoGás, UBE Industries, União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), Prex Diesel-Gás e Zeg Biogás.

Devem ser também destacados, aqui, todos os membros da equipe de Aproveitamento Energético de Resíduos do BEP, os quais, durante a execução do projeto, dedicaram seu tempo e conhecimento para a elaboração de uma análise de excelência técnica e relevância social. Muito obrigado a todos e a todas.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 ASPECTOS METODOLÓGICOS	13
3 ANÁLISE ECONÔMICA DE BIOGÁS NA PECUÁRIA: SUINOCULTURA	16
4 ANÁLISE ECONÔMICA DE BIOGÁS NA PECUÁRIA: BOVINOCULTURA DE LEITE	23
4.1 Bovinocultura de leite: 500 vacas em lactação	23
4.2 Bovinocultura de leite: 1.000 vacas em lactação	26
5 ANÁLISE ECONÔMICA DE BIOGÁS NA INDÚSTRIA: USINA SUCROENERGÉTICA	32
5.1 Indústria sucoenergética: 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada anualmente	32
5.2 Indústria sucoenergética: 3,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada anualmente	40
6 CONTRIBUIÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM BIOGÁS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA	46
7 CONSIDERAÇÕES E PERSPECTIVAS PARA OS MODELOS DE NEGÓCIO EM BIOGÁS NO BRASIL	49
8 REFERÊNCIAS	51

APÊNDICE I	53
ANÁLISE PRELIMINAR DOS CASOS	53
APÊNDICE II	56
PREMISSAS GERAIS CONSIDERADAS NAS ANÁLISES	56
APÊNDICE III	65
CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS NA SUINOCULTURA EM TERMINAÇÃO	65
APÊNDICE IV	72
CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS NA BOVINOCULTURA DE LEITE – 500 ANIMAIS EM LACTAÇÃO	72
APÊNDICE V	77
CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS NA BOVINOCULTURA DE LEITE – 1.000 ANIMAIS EM LACTAÇÃO	77
APÊNDICE VI	84
CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS EM USINA SUCROENERGÉTICA – PROCESSAMENTO DE 2.000.000 T DE CANA-DE-ACÚCAR	84
APÊNDICE VII	94
CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS EM USINA SUCROENERGÉTICA – PROCESSAMENTO DE 3.500.000 T DE CANA-DE-ACÚCAR	94
APÊNDICE VIII	104
TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA, DIESEL E GÁS NATURAL	104
APÊNDICE IX	107
COMPILAÇÃO DE PREMISSAS UTILIZADAS NA MODELAGEM ECONÔMICA DOS CASOS	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEP	<i>Brazil Energy Programme</i>
BLC	Biodigestor de lagoa coberta
BRL	Real brasileiro
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CBIOS	Crédito de descarbonização
CH₄	Metano
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás
CO₂	Dióxido de carbono
COP26	26ª Convenção das Partes
CSTR	<i>Continuous stirred-tank reactor</i>
DMVU	Dinheiro Movimentado ao longo da Vida Útil
EPC	<i>Engineering procurement and construction</i>
ESG	<i>Environmental, social and corporate governance</i>
EUA	Estados Unidos da América
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GD	Geração Distribuída
GNV	Gás Natural Veicular
H₂S	Sulfeto de hidrogênio
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
LCOB	Custo Nivelado de Biometano
LCOE	Custo Nivelado de Eletricidade
m³	Metros cúbicos
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MME	Ministério de Minas e Energia
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
SLP	Sistema de Levantamento de Preços
TIR	Taxa Interna de Retorno
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
VPL	Valor Presente Líquido
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i>

1

INTRODUÇÃO

A tendência e a urgência globais para o desenvolvimento de ações que visam a mitigar as mudanças climáticas têm convocado governos, organizações internacionais e iniciativas privadas a se prepararem para um cenário de investimentos em energia mais sustentável. Exemplos dessas ações são: o anunciado plano de infraestrutura dos EUA, de USD 2 trilhões (THE WHITE HOUSE, 2021); a nova revolução industrial verde do Reino Unido (UK GOVERNMENT, 2020); a *International Energy Agency* (IEA, 2021); o compromisso específico internacional de redução de emissões de metano, realizado na Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP26)¹; e várias iniciativas de multinacionais (ABINBEV, 2020; JBS FOODS, 2021). Outro exemplo importante diz respeito aos crescentes mecanismos de financiamento verde e à demanda por fundos do tipo ESG² (FINANCIAL TIMES, 2021).

Esse panorama corrobora a relevância de investimentos para o aproveitamento energético de resíduos no Brasil, principalmente relacionados à produção de biogás, quando se leva em conta que grande parte do potencial está associado a atividades pecuárias e industriais. Como o Brasil é grande exportador de commodities agropecuárias, a tendência é que o mercado internacional crie demandas por produtos produzidos de maneira menos agressiva, no que diz respeito aos impactos ambientais, e mais positivos em relação aos impactos sociais. De fato, as multinacionais são atores-chave para transmitir essa demanda, bem como, para promover a cooperação internacional e novos acordos comerciais visando a investimentos em negócios mais sustentáveis.

Diferentemente de outras tecnologias de produção de energia, as tecnologias existentes para o aproveitamento energético de resíduos são múltiplas, assim, possibilitam que investidores possam promover projetos a partir de inúmeras rotas tecnológicas. O foco desta publicação está direcionado à rota tecnológica da biodigestão, ou seja, ao aproveitamento energético dos resíduos através da produção de biogás. Entretanto, as possibilidades de uso de diversos substratos³ e a possibilidade de obtenção de vários produtos⁴ fazem com que a biodigestão apresente uma variedade de modelos de negócios possíveis.

¹ Outras informações em: <https://www.globalmethanepledge.org/>

² Investimentos do tipo ESG (do inglês: Environmental, Social e Governance) referem-se à classe de investimentos também conhecidos como investimentos sustentáveis.

³ Os substratos podem ser resíduos oriundos da pecuária, indústria e saneamento.

⁴ Os produtos possíveis são energia elétrica, biometano, energia térmica e digestato.

Alguns aspectos, porém, devem ser levados em conta na hora de se realizar esses arranjos. Inicialmente, a combinação entre especificidades regionais e características setoriais cria diferentes nichos no país, impondo algumas limitações de acesso a infraestruturas, recursos e *stakeholders* do setor. Por exemplo, o mercado de energia elétrica possui regras válidas para todo o país, as quais não são válidas para o mercado de gás, que possui regulamentação compartilhada entre as esferas federal e estadual. A pecuária, por sua vez, apresenta influência regional, pois os resíduos gerados variam conforme os sistemas de produção locais. Portanto, os negócios são afetados, pois dependem da legislação local e do tipo de substrato disponível em nível regional.

As políticas de outros setores também podem influenciar no desenvolvimento de modelos de negócios de biogás. Um exemplo disso é a nova lei que determina regras sobre serviços ambientais (Lei 14.119/2021), estabelecendo bases para o pagamento por este tipo de serviço. Políticas de esferas estaduais e locais também são relevantes, como as voltadas para a característica de circularidade dos projetos de aproveitamento energético de resíduos, pois estas, ao promoverem a economia circular, favorecem seus modelos de negócios.

As desigualdades de renda, gênero e raça, em geral, nesse setor, também variam entre áreas urbanas e rurais e entre as regiões brasileiras. Isso significa que, dependendo da localização, os projetos de produção de biogás podem enfrentar diferentes realidades e atuar na melhoria de diversos indicadores sociais. Desse modo, a importância do biogás como modelo de negócios está, também, na possibilidade de abrir oportunidades de maior inclusão e diversidade social, que poderão trazer mais impactos positivos ao desenvolvimento socioeconômico local.

Por fim, esta análise quer mostrar a importância e a viabilidade econômica do biogás em distintos modelos de negócios. Uma forma de avaliar o impacto e decidir sobre a implementação de ideias e projetos ocorre por meio da análise econômica, uma vez que esta permite estimar o valor gerado, bem como, evidenciar o retorno financeiro sobre o investimento, a fim de que somente sejam aprovados os projetos que tenham um retorno acima do seu custo de capital.

2

ASPECTOS METODOLÓGICOS

O objetivo do estudo é apresentar uma análise econômica da produção de biogás, com a finalidade de prover dados atuais sobre o setor, assim como, criar um portfólio de casos em geral, para informar tomadores de decisão. Além disso, como há estimativa de retorno sobre os investimentos, essa análise proporciona a possibilidade de comparação entre diferentes tipos de investimentos, uma vez que traduz todas as transações financeiras em métricas padronizadas e comparáveis.

Especificamente, este estudo busca um maior entendimento da viabilidade econômica de casos com produção de biogás para geração de energia elétrica e produção de biometano. Para mostrar a viabilidade, mapeou-se os segmentos que têm potencial de produção de biogás, considerando setores que possuem disponibilidade de informações técnicas e casos efetivos com produção de biogás com aproveitamento energético. Dessa forma, os seguintes critérios foram definidos para a escolha dos casos representativos em relação à escala e produção de biogás (as premissas estão descritas em detalhes no **Apêndice I**):

- *porte suficiente para uma análise de geração de energia elétrica ou biometano;*
- *produção de resíduos em quantidade suficiente para serem atendidos pelos principais fornecedores de equipamentos e serviços de biodigestão;*
- *informações suficientes sobre necessidade de equipamento e potencial de geração de biogás;*
- *dados concretos e atuais sobre geração de biogás, assim como, dimensionamento satisfatório para a replicação do modelo.*

Para tanto, foram selecionados casos da pecuária (bovinocultura de leite e suinocultura de terminação) e da indústria sucroenergética. No âmbito de cada setor, foram analisados diferentes tamanhos ou escalas de produção e geração de resíduo, para estimar um porte médio expressivo em termos de operações no Brasil.

Imprescindível observar que os casos analisados, neste documento, não são empreendimentos existentes, mas casos construídos com base em dados reais, utilizando porte suficiente para produzir biogás e gerar energia elétrica e/ou biometano, com disponibilidade de informações sobre as rotas tecnológicas e equipamentos, configurados e dimensionados de tal forma a se aproximarem de empreendimentos existentes no país.

A partir das rotas tecnológicas definidas para os cenários delineados em cada caso, com seus respectivos valores de investimento, operação e manutenção, além de possibilidades de receitas, foram realizadas simulações econômicas a fim de se obter dados de base referentes ao Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE)⁵ e ao Custo Nivelado do Biometano (LCOB)⁶ de cada cenário, e os principais indicadores econômicos de viabilidade de um projeto: Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e o *Payback* ou tempo para o retorno do investimento. Estes indicadores econômicos são apresentados nos resultados dos cenários de cada caso: **APÊNDICE III** (suinocultura de terminação); **APÊNDICES IV e V** (bovinocultura de leite); e **APÊNDICES VI e VII** (indústria sucroenergética).

Além disso, também foram calculados os lucros antes de juros, impostos, depreciação e amortização (EBITDA, do inglês: *earnings before interest, taxes, depreciation and amortization*) de cada projeto, *payback* e o total de dinheiro movimentado ao longo da vida útil do mesmo (DMVU), resultado da soma das receitas, CAPEX⁷ e OPEX⁸. As premissas, a metodologia e demais especificidades de cada caso e dos cenários que compõem os resultados podem ser encontrados, de forma detalhada, nos **APÊNDICES I, II, III, IV, V, VI e VII**.

⁵ Em inglês *levelized cost of electricity*.

⁶ Em inglês *levelized cost of biomethane*.

⁷ A sigla CAPEX deriva do inglês *Capital Expenditure* e se refere a despesas de capital ou investimento.

⁸ A sigla OPEX vem da expressão *Operational Expenditure*, que significa despesas operacionais.

Contudo, os custos de tecnologia para a produção de biogás estão sujeitos a influências individuais e regionais, e um único valor de LCOE, LCOB e TIR simplificaria demais os resultados, além de subjugar as incertezas envolvidas. Dadas as diversas possibilidades, um dos principais resultados é a construção de faixas que mostrem a competitividade dos cenários com produção de biogás e geração de energia elétrica e biometano.

Para tanto, os resultados-base de LCOE, LCOB e TIR foram submetidos a análise de sensibilidade para abranger as incertezas sobre os principais parâmetros e identificar as variáveis que possuem maior influência nos resultados de viabilidade econômica, de modo a revelar quais cenários e em quais condições são mais competitivos ou, ao contrário, não apresentam competitividade e, portanto, geram menor lucratividade.

Uma das incertezas envolvidas nos projetos de biogás decorre da receita dos cenários, composta pelo valor da energia e biometano gerados, parâmetro com influência na lucratividade. Nos cenários com geração de energia elétrica, a incerteza discutida no momento refere-se à mudança no marco legal da geração distribuída, instituída pela Lei 14.300/2021⁹.

De modo a alcançar os objetivos propostos, esta publicação apresenta, em formato técnico, os resultados da análise econômica de unidades que estão divididas nos seguintes setores: i) pecuária (suinocultura em sistema de terminação e bovinocultura de leite) e ii) indústria sucroenergética.

⁹ A Lei 14.300/2021 dispõe sobre o Marco Legal da Geração Distribuída. Nos cenários com geração de energia elétrica na modalidade de geração distribuída, houve a preocupação em contextualizar a mudança nas projeções dos resultados, através da análise de sensibilidade. Os cenários-base partem do princípio de projetos já existentes ou cuja solicitação e acesso tenha sido protocolada até 12 meses antes da publicação dessa lei. A principal consideração abordada é a remuneração da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) fio B.

3

ANÁLISE ECONÔMICA DE BIOGÁS NA PECUÁRIA: SUINOCULTURA

Na análise econômica da produção de biogás e aproveitamento energético na suinocultura, foi considerado o biogás de um plantel de 10 mil cabeças em fase de terminação, com duas rotas tecnológicas para aproveitamento do biogás: geração de energia elétrica e biometano.

No caso da suinocultura, a análise econômica foi realizada em três cenários: (i) geração de energia elétrica a partir do biogás com aproveitamento dos créditos de energia gerados no modelo de geração distribuída para autoconsumo remoto, grupo tarifário B3, dentro da área de concessão da CEMIG (cenário A); (ii) geração de energia elétrica a partir do biogás para autoconsumo, grupo tarifário B2, dentro da área de concessão da CEMIG (cenário B); (iii) produção de biogás e *upgrade* para autoconsumo de biometano (30%) em substituição ao diesel na frota, e o excedente (70%) considerado com o preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe (cenário C).

As premissas consideradas e os resultados-base (valor-base)¹⁰ da análise de viabilidade econômica e de sensibilidade, de cada cenário, podem ser consultados nos **Apêndices II e III**.

¹⁰ Valor-base refere-se ao resultado da análise de viabilidade econômica, consideradas as premissas empregadas, ou seja, é o valor obtido antes de as variáveis sofrerem alteração com a análise de sensibilidade.

Os resultados obtidos na análise de viabilidade foram submetidos a uma análise de sensibilidade, com variações de $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica e variações de $\pm 50\%$ nos cenários com geração de biometano. Os resultados demonstram que o LCOE pode variar entre 177 e 379 BRL/MWh, sendo o valor de base médio de 252 BRL/MWh. O LCOB pode variar entre 0,40 e 0,95 BRL/m³, com um valor-base de 0,55 BRL/m³.

No gráfico de competitividade da **Figura 1**, a comparação do LCOE com o preço da energia elétrica dos grupos tarifários A4, B2, B3 e do mercado livre não contempla os impostos incidentes sobre a energia elétrica, ou seja, tanto os valores de LCOE quanto os das tarifas de energia são valores sem impostos. Isto ocorre devido ao fato de os cenários desse caso de aproveitamento energético dos resíduos da suinocultura contemplarem a modalidade de autoconsumo (geração distribuída com autoconsumo remoto e autoconsumo local). Nesses casos, os cenários se beneficiam pela ausência dos impostos, o que eleva o retorno econômico dos cenários com geração de energia elétrica. Contudo, se nas tarifas de energia elétrica fossem acrescentados os impostos, a competitividade dos cenários se elevaria, porém, a análise de sensibilidade acaba considerando os dois lados: a falta de imposto na receita e a falta de imposto no custo.

O LCOE mais competitivo foi obtido no cenário da modalidade com autoconsumo local da energia elétrica gerada (cenário B), com variação de 40% para menos de OPEX na análise de sensibilidade. No caso do LCOE menos competitivo, o resultado ocorreu no cenário A, com uma variação de 40% para menos no parâmetro de produtividade e eficiência.

Figura 1
Custo nivelado de energia elétrica (LCOE) gerada a partir de biogás de resíduos da suinocultura (sem impostos) comparado às tarifas de energia elétrica (sem impostos).



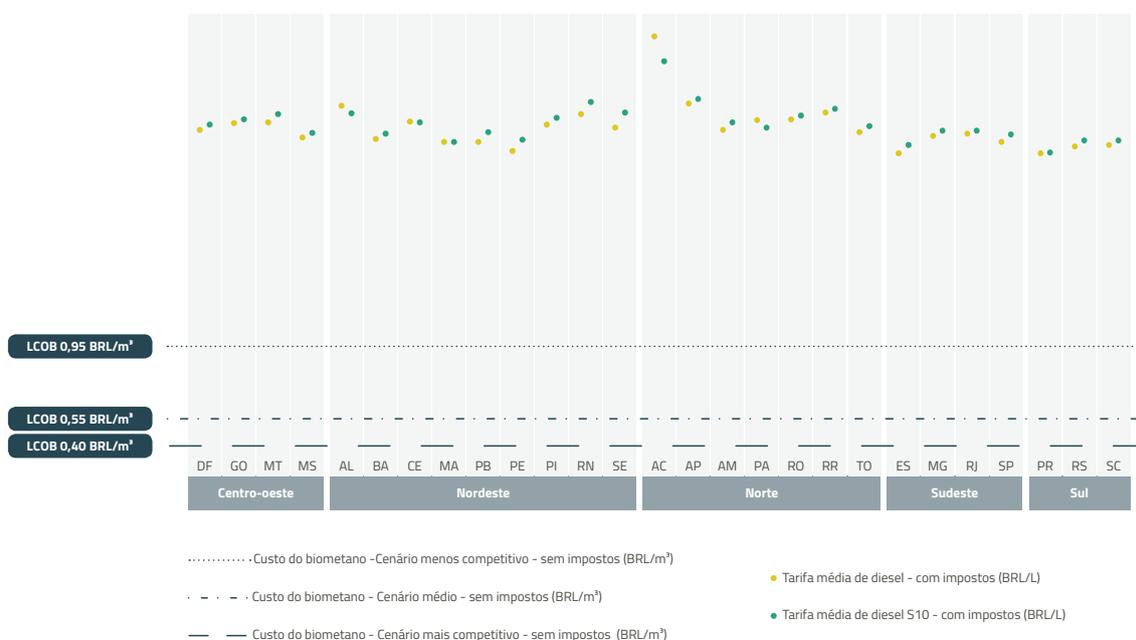
A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de energia elétrica é apresentado no Apêndice VIII.
 Tarifas de energia elétrica sem impostos em 2020. Tarifa média para Mercado Livre praticada nos últimos 6 meses de 2020.
 As estimativas de custos de tarifas de energia elétrica foram obtidas através dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição, realizados pela ANEEL para o ano de 2020.

Observa-se que, no cenário mais competitivo no caso da suinocultura, o LCOE seria viável tanto quando comparado à tarifa de energia no mercado regulado, em todos os estados, quanto no mercado livre. O LCOE menos competitivo não seria viável com algumas tarifas do grupo B2 e no mercado livre, ou seja, nessa faixa, o LCOE é maior do que o custo de energia praticado.

Na rota tecnológica de geração de biometano, o LCOB mais competitivo foi obtido com diminuição de 50% do CAPEX na análise de sensibilidade. Para o LCOB menos competitivo, a variação de 50% para menos, na produtividade e eficiência, foi o fator determinante.

A **Figura 2** apresenta a análise gráfica da competitividade do LCOB, considerando o preço do diesel e diesel S10 para efeitos de substituição do diesel pelo biometano. Os preços do diesel e diesel S10 são preços médios praticados em postos de combustíveis e, portanto, acrescidos de impostos e demais tributos, enquanto os valores de LCOB não contêm impostos. Esta condição eleva a competitividade dos cenários com geração de biometano. No entanto, a análise de sensibilidade prevê a parte dos impostos na receita e no custo de produção do biometano.

Figura 2
Custo nivelado de biometano (LCOB) gerado a partir de biogás de resíduos da suinocultura (sem impostos) comparado às tarifas de diesel e diesel S10 (com impostos).

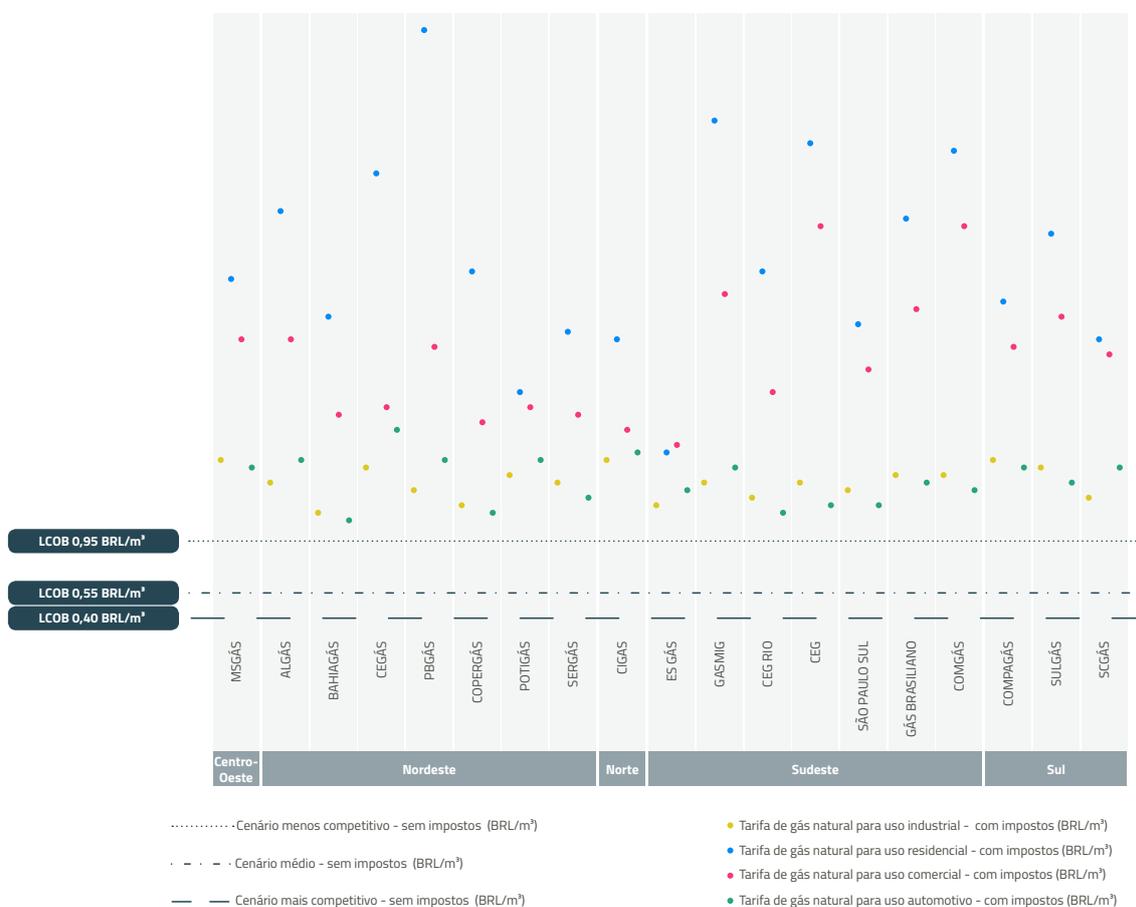


A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de diesel e diesel S10 é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de diesel com impostos e tributos em 2020. Os custos médios de Diesel e Diesel S10, dos postos de combustível de todos os estados, foram obtidos do Sistema de Levantamento de Preços (SLP) (ANP, 2021), com médias de preços nos períodos de 04/04/21 até 10/04/21.

Observa-se que o LCOB, comparado ao preço do diesel e diesel S10, seria viável do cenário menos competitivo ao mais competitivo. Isso demonstra que o LCOB e suas variações de sensibilidade apresentam um custo menor do que o custo do diesel, considerando as premissas de cada cenário.

Na **Figura 3**, a comparação do LCOB é realizada com os preços do gás natural (gás natural para uso industrial, comercial, residencial e automotivo), com a finalidade de complementaridade para esse combustível. Os preços do gás natural são acrescidos de impostos e demais tributos, enquanto os valores de LCOB não contêm impostos.

Figura 3
Custo nivelado de biometano (LCOB) gerado a partir de biogás de resíduos da suinocultura (sem impostos) comparado às tarifas de gás natural (com impostos).



A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de gás natural é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de gás natural com impostos e tributos em 2020. A referência de preços foi retirada do Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural do mês de outubro de 2020 (MME, 2021).

Da mesma forma que ocorre quando comparado ao custo do diesel, o LCOB comparado às tarifas de gás natural apresenta viabilidade para todos os usos considerados, até no cenário menos competitivo. Isso demonstra que o LCOB e suas variações de sensibilidade apresentam um custo menor do que o custo do gás natural, considerando as premissas de cada cenário.

Os resultados-base (cenário médio) para a taxa interna de retorno (TIR) sinalizam viabilidade econômica, consideradas as premissas dos cenários da suinocultura. Entretanto, foi realizada a análise de sensibilidade da TIR em relação às variáveis que possuem maior influência nessa viabilidade. A TIR, nos cenários com geração de energia elétrica, obtida na análise de viabilidade e, posteriormente, na análise de sensibilidade, apresenta uma variação de 1,2% no cenário menos competitivo e 44,3% no cenário mais competitivo, com valor de base médio de 24,7%. A **Figura 4** apresenta os cenários de competitividade da TIR para a geração de energia elétrica.

Figura 4
Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração de energia elétrica de resíduos da suinocultura e comparação às taxas de retorno de investimento.



*Setor de energia elétrica (2020).

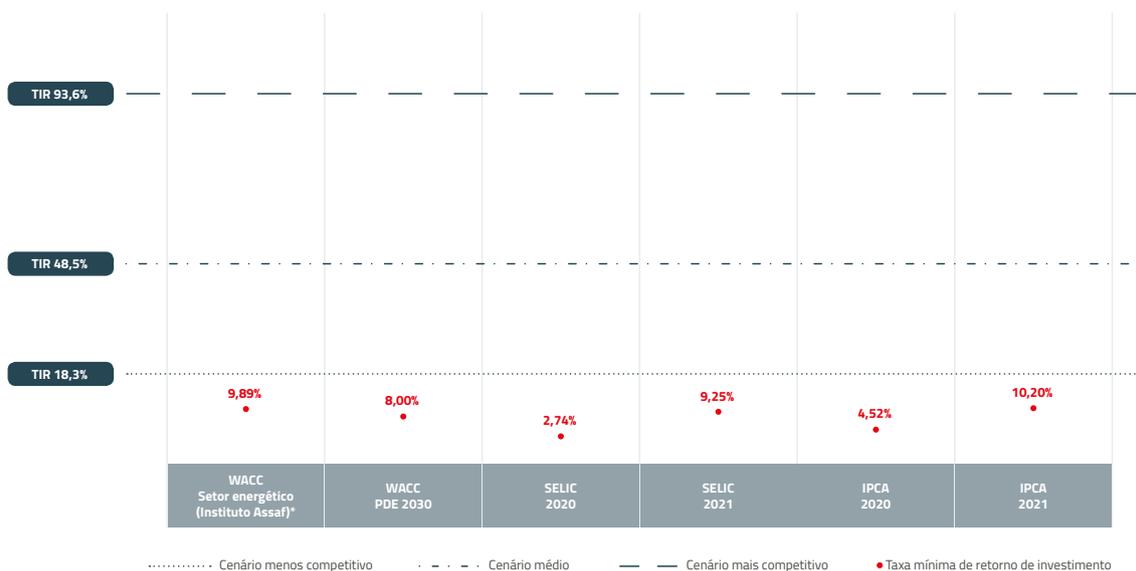
No cenário menos competitivo, a TIR está abaixo do custo de capital, que é representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC)¹¹ do setor de energia elétrica, cujo valor representa 9,07%, e pelas demais taxas de retorno, assim, conseqüentemente, não apresenta retorno atrativo do investimento, neste caso. O cenário médio e o cenário mais competitivo mostram viabilidade econômica ao se analisar todas as taxas de retorno apresentadas.

¹¹ O custo de capital de referência utilizado nos cenários é o custo médio ponderado do capital (WACC), que, em inglês, é *Weighted Average Cost of Capital*. No Brasil, o Instituto Assaf calcula o WACC para diferentes segmentos, sendo o valor atualizado de 9,07% para energia elétrica e 9,89% para o biometano, referente ao petróleo, gás e biocombustíveis. Entretanto, foram utilizadas outras taxas mínimas de retorno, por exemplo: o WACC, considerado no Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, a SELIC e o IPCA, para fins de comparação com a TIR dos cenários nos gráficos de competitividade.

O parâmetro que mais influencia a TIR, nos cenários com geração de energia elétrica, com variação de 40% no cenário mais competitivo e no cenário menos competitivo, é a receita. A Lei 14.300/2021, que dispõe sobre o Marco Legal da Geração Distribuída, pode influenciar nesse parâmetro, visto que irá alterar a receita. Nas condições e premissas, aqui consideradas, do cenário A (ver **Apêndice III**), a receita do cenário com geração de créditos por geração distribuída com autoconsumo remoto poderia ser reduzida em até 25%, atingindo 11,8% de TIR, ainda acima do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, a partir do qual apresentará rentabilidade para o produtor da energia.

Quanto ao biometano, a variação da TIR é maior, com uma TIR de 18,3% no cenário menos competitivo e de 93,6% no cenário mais competitivo, conforme apresentado na **Figura 5**. A TIR menos competitiva ocorreu com a redução de 50% na receita, e a TIR mais competitiva, com variação para menos de 50% no CAPEX.

Figura 5
Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração de biometano de resíduos da suinocultura e comparação às taxas de retorno de investimento.



*Setor de petróleo, gás e biocombustíveis (2020).

Ambos os cenários de competitividade para o biometano apresentam TIR acima do custo de capital de todas as taxas apresentadas, o que sinaliza lucratividade no cenário de geração de biometano, considerando as premissas empregadas.

4

ANÁLISE ECONÔMICA DE BIOGÁS NA PECUÁRIA: BOVINOCULTURA DE LEITE

No caso da bovinocultura de leite, foram empregadas unidades de produção com 500 e 1.000 bovinos em lactação. Nesta análise econômica da produção de biogás e aproveitamento energético da bovinocultura de leite, foram consideradas duas rotas tecnológicas para aproveitamento do biogás: a geração de energia elétrica e a geração de biometano como fontes de receita. As premissas consideradas e os resultados-base da análise de viabilidade econômica e de sensibilidade de cada caso e seus cenários podem ser consultados nos *Apêndices II, IV e V*.

4.1 Bovinocultura de leite: 500 vacas em lactação

Nesta análise, foi considerado um plantel de 500 vacas em lactação, em sistema de confinamento, com produção de biogás e geração de energia elétrica como fontes de receita. As premissas consideradas e os resultados-base (valor-base) da análise de viabilidade econômica e de sensibilidade, de cada cenário, podem ser consultados nos *Apêndices II e IV*.

A análise econômica foi realizada em dois cenários: (i) produção de biogás com geração de energia elétrica e aproveitamento dos créditos de energia gerados no modelo de geração distribuída para autoconsumo remoto, grupo tarifário B3, dentro da área de concessão da CEMIG (cenário A); (ii) produção de biogás com geração de energia elétrica para autoconsumo da energia gerada, grupo tarifário B2, na área de concessão da CEMIG (cenário B).

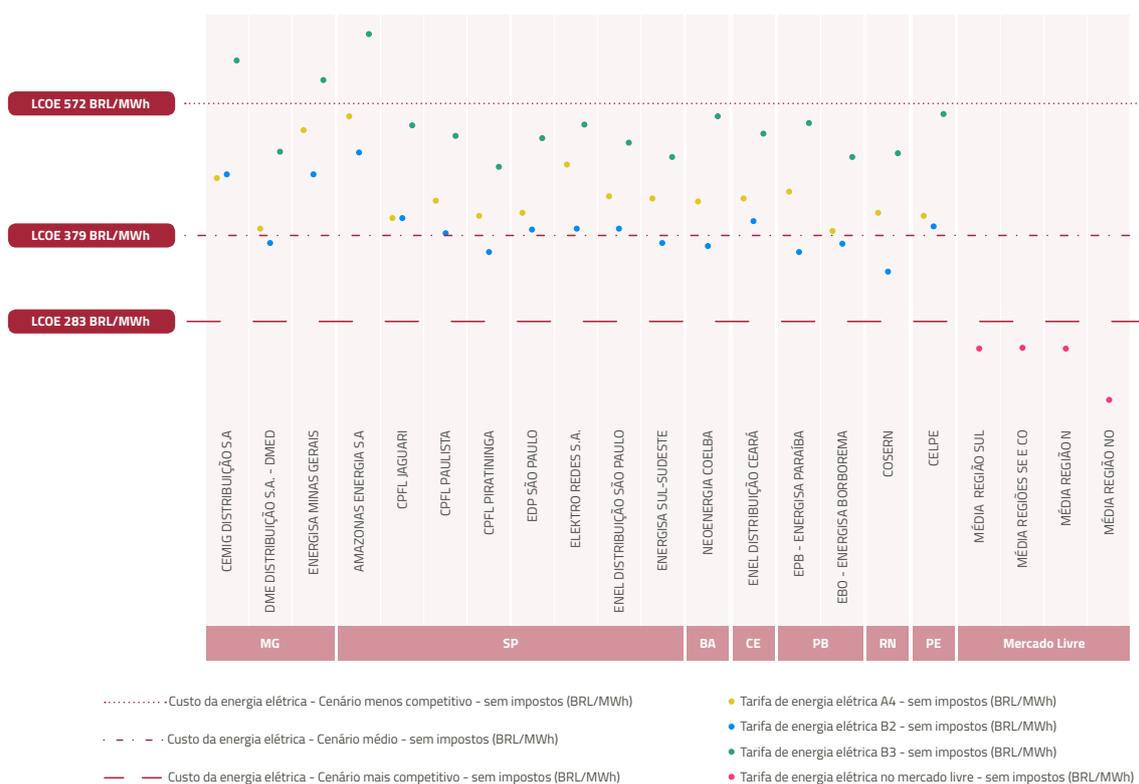
Os resultados obtidos na análise de viabilidade, que foram submetidos a uma análise de sensibilidade, com variações para $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica, demonstram que o LCOE pode variar entre 283 e 572 BRL/MWh, sendo o valor-base médio 379 BRL/MWh.

O LCOE mais competitivo foi obtido no cenário de autoconsumo da energia elétrica gerada (cenário B), com variação de 40% para menos de CAPEX na análise de sensibilidade. No caso do LCOE menos competitivo, o resultado ocorreu no cenário com aproveitamento da energia com créditos em geração distribuída (cenário A), com variação de menos 40% na produtividade e eficiência.

Na **Figura 6**, apresenta-se a análise gráfica da competitividade do LCOE, considerando o preço da energia elétrica dos grupos tarifários A4, B2, B3 e do mercado livre. Os preços da energia elétrica não contêm impostos, assim como os valores de LCOE, pois os cenários desse caso de aproveitamento energético dos resíduos da bovinocultura de leite contemplam a modalidade de autoconsumo (geração distribuída com autoconsumo remoto e autoconsumo local), desse modo, a ausência de impostos retorna como parte da receita, elevando o retorno econômico dos cenários com geração de energia elétrica. Contudo, se fossem acrescidos os impostos na tarifas de energia elétrica, a competitividade dos cenários se elevaria. Entretanto, a análise de sensibilidade acaba considerando os dois lados: a falta de imposto na receita e a falta de imposto no custo.

Figura 6

Custo nivelado de energia elétrica (LCOE) gerada a partir de biogás de resíduos da bovinocultura de leite 500 vacas (sem impostos) comparado às tarifas de energia elétrica (sem impostos).



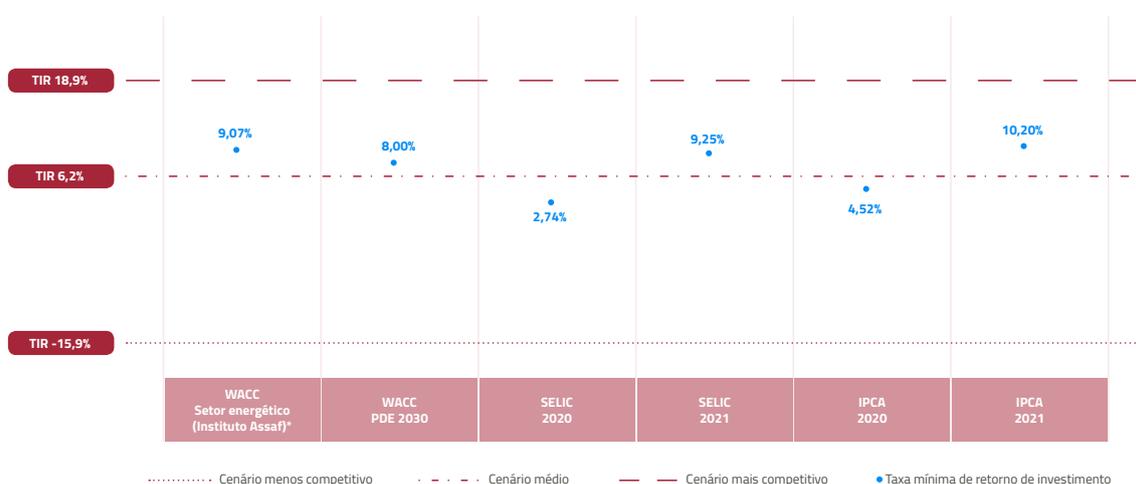
A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de energia elétrica é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de energia elétrica sem impostos em 2020. Tarifa média para Mercado Livre praticada nos últimos 6 meses de 2020. As estimativas de custos de tarifas de energia elétrica foram obtidas através dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição, realizados pela ANEEL para o ano de 2020.

No cenário mais competitivo, no caso da bovinocultura de leite com 500 vacas em lactação, o LCOE seria viável ao ser comparado à tarifa de energia no mercado regulado, em todos os estados, menos com as tarifas do mercado livre. O LCOE menos competitivo é viável somente em poucos locais com tarifa do grupo B3, conforme gráfico da **Figura 6**.

A taxa interna de retorno (TIR), nos cenários com geração de energia elétrica, obtida pela análise de viabilidade e seguida pela análise de sensibilidade, apresenta uma variação entre -15,9% no cenário menos competitivo e 18,9% no cenário mais competitivo, com valor de base médio de 6,2%. A **Figura 7** apresenta os cenários de competitividade da TIR para a geração de energia elétrica.

Figura 7

Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração de energia elétrica de resíduos da bovinocultura de leite 500 vacas e comparação às taxas de retorno de investimento.



*Setor de energia elétrica (2020).

O resultado-base (cenário médio) para a taxa interna de retorno (TIR) está abaixo do custo de capital representado pelo custo médio ponderado de capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%. Foi realizada a análise de sensibilidade da TIR em relação às variáveis que causam maior impacto nessa viabilidade, sendo a receita o parâmetro com maior influência. A TIR é negativa no cenário menos competitivo, referente ao autoconsumo de energia (cenário B), portanto, é inviável. No cenário mais competitivo, a TIR, que no cenário médio é inviável, fica acima do custo de capital de todas as taxas apresentadas, pois a receita aumenta em 40%.

A maior influência da Lei 14.300/2021, que dispõe sobre o Marco Legal da Geração Distribuída, é na receita dos cenários. Nas condições e premissas aqui consideradas, no cenário A (ver **Apêndice IV**), a receita do cenário com geração de créditos por geração distribuída com autoconsumo remoto apresenta o valor de base abaixo do custo de capital, portanto, qualquer redução na receita deixaria esse cenário menos viável.

4.2 Bovinocultura de leite: 1.000 vacas em lactação

Para este caso de bovinocultura de leite, foi considerado um sistema de confinamento com 1.000 vacas em lactação, com duas rotas tecnológicas principais para aproveitamento do biogás: geração de energia elétrica e biometano. As premissas consideradas e os resultados-base (valor-base) da análise de viabilidade econômica e de sensibilidade, de cada cenário, podem ser consultados nos **Apêndices II e V**.

Foram considerados três cenários para análise de viabilidade econômica: (i) produção de biogás com geração de energia elétrica e aproveitamento dos créditos de energia gerados, no modelo de geração distribuída por autoconsumo remoto, grupo tarifário B3 e área de concessão da CEMIG (cenário A); (ii) produção de biogás com geração de energia elétrica para o autoconsumo da energia gerada, grupo tarifário B2 e área de concessão da CEMIG (cenário B); (iii) produção de biogás e *upgrade* para autoconsumo de biometano (30%) em substituição ao diesel na frota, e o excedente (70%) considerado com o preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe (cenário C).

Os resultados obtidos na análise de viabilidade foram submetidos a uma análise de sensibilidade, com variações de $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica e variações para $\pm 50\%$ nos cenários com geração de biometano. Os resultados revelam que o LCOE pode variar entre 235 e 467 BRL/MWh, sendo o valor de base médio 312 BRL/MWh e o LCOB com variação entre 0,49 e 1,22 BRL/m³ de biometano, com um valor-base médio de BRL 0,72.

O LCOE mais competitivo foi obtido no cenário com autoconsumo da energia elétrica (cenário B), com variação de 40% para menos de CAPEX na análise de sensibilidade. No caso do LCOE menos competitivo, o resultado ocorreu no cenário A, com 40% para menos na produtividade e eficiência.

Os valores de LCOE são comparados aos preços médios de energia elétrica dos grupos tarifários A4, B2, B3 e do mercado livre, no gráfico de competitividade da **Figura 8**. Os preços médios de energia elétrica não incorporam os impostos incidentes, ou seja, tanto os valores de LCOE quanto das tarifas de energia são valores sem impostos, pois os cenários desse caso de aproveitamento energético dos resíduos da bovinocultura de leite contemplam a modalidade de autoconsumo (geração distribuída com autoconsumo remoto e autoconsumo local). Nesses casos, os cenários capturam o benefício do imposto, que retorna como parte da receita e eleva o ganho econômico dos cenários com geração de energia elétrica. Contudo, se as tarifas de energia elétrica contivessem os impostos, a competitividade dos cenários se elevaria. Entretanto, a análise de sensibilidade acaba considerando os dois lados: a falta de imposto na receita e a falta de imposto no custo.

Figura 8
Custo nivelado de energia elétrica (LCOE) gerada a partir de biogás de resíduos da bovinocultura de leite 1.000 vacas (sem impostos) comparado às tarifas de energia elétrica (sem impostos).



A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de energia elétrica é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de energia elétrica sem impostos em 2020. Tarifa média para Mercado Livre praticada nos últimos 6 meses de 2020. As estimativas de custos de tarifas de energia elétrica foram obtidas através dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição, realizados pela ANEEL para o ano de 2020.

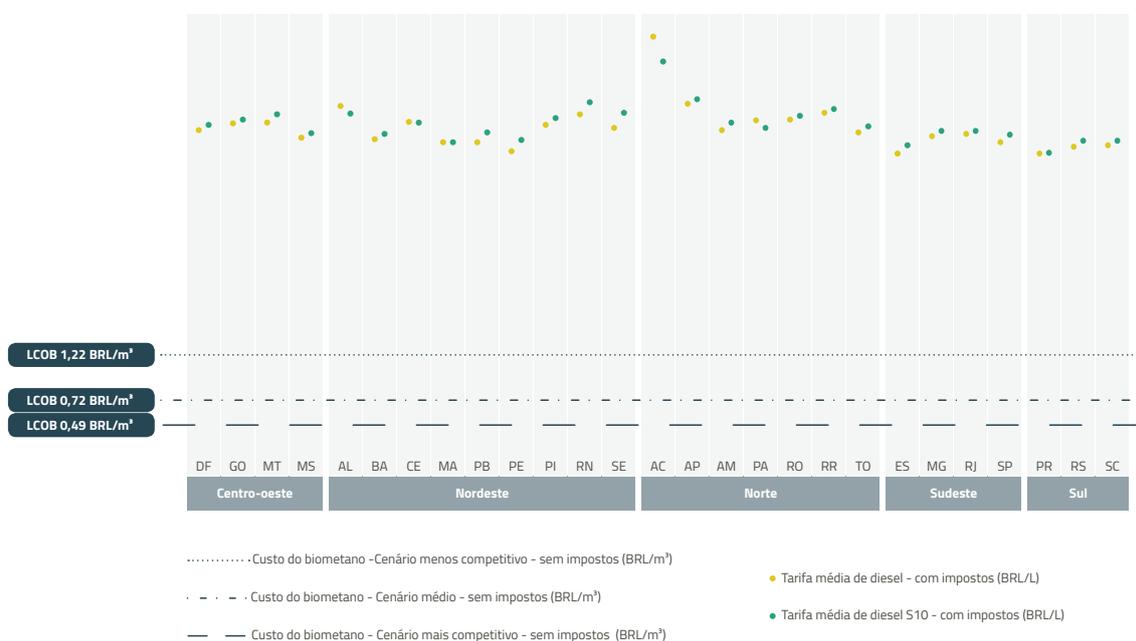
Na geração de energia elétrica pela bovinocultura com 1.000 vacas, no cenário mais competitivo, o LCOE seria viável quando comparado à tarifa de energia no mercado regulado, em todos os estados, exceto ao ser comparado às tarifas do mercado livre de uma única região. O LCOE, em cenário menos competitivo, ainda seria viável em alguns estados com tarifas do grupo B3, A4 e B2, conforme o gráfico da **Figura 8**. Nas tarifas em que o LCOE é considerado inviável, significa que, nesses casos, o LCOE é maior do que o custo de energia praticado.

Ao se considerar a geração de biometano, o LCOB mais competitivo foi obtido com variação de 50% para menos de CAPEX na análise de sensibilidade, e no cenário menos competitivo, a diminuição de 50% na produtividade e eficiência foi o fator decisório.

A análise gráfica da competitividade do LCOB, considerando o preço do diesel e diesel S10, para efeitos de substituição do diesel pelo biometano, está na **Figura 9**. Os preços do diesel e diesel S10 são preços médios praticados em postos de combustíveis e, portanto, acrescidos de impostos e demais tributos, enquanto os valores de LCOB¹² não contêm impostos. Esta condição eleva a competitividade dos cenários com geração de biometano. No entanto, a análise de sensibilidade prevê a variação de valores de imposto na receita e no custo do biometano.

O LCOB comparado ao preço do diesel e diesel S10 seria viável em todos os cenários de competitividade. Isso demonstra que o LCOB e suas variações de sensibilidade apresentam um custo menor do que o custo do diesel, considerando as premissas de cada cenário.

Figura 9
Custo nivelado de biometano (LCOB) gerado a partir de biogás de resíduos da bovinocultura de leite 1.000 vacas (sem impostos) comparado às tarifas de diesel e diesel S10 (com impostos).



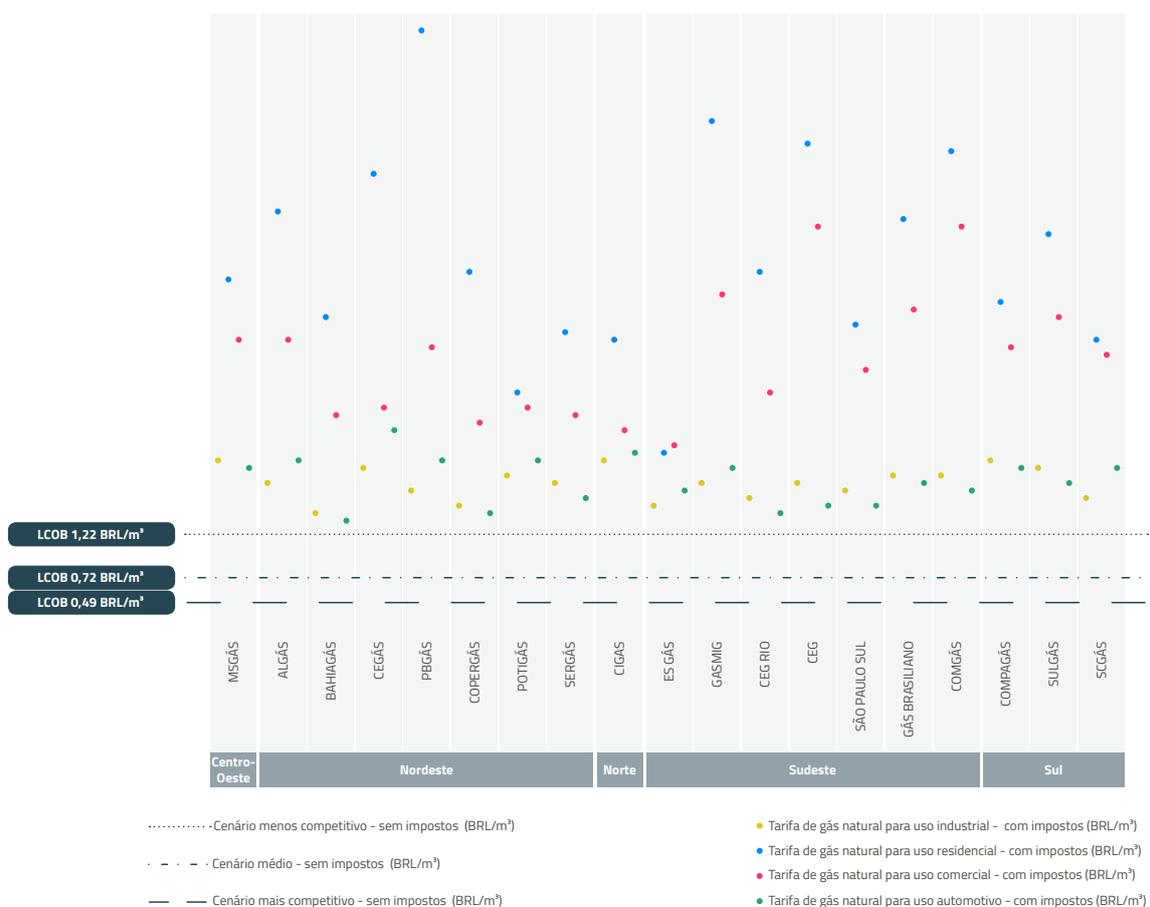
A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de diesel e diesel S10 é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de diesel com impostos e tributos em 2020. Os custos médios de Diesel e Diesel S10, dos postos de combustível de todos os estados, foram obtidos do Sistema de Levantamento de Preços (SLP) (ANP, 2021), com médias de preços nos períodos de 04/04/21 até 10/04/21.

¹² Assim como o LCOE, o LCOB, criado a partir da mesma lógica, serve para entender o custo do biometano gerado ao longo de sua vida útil, considerando todos os gastos envolvidos desde o investimento bem como operação. Para determinar o preço de venda do biometano para chegar ao valor do LCOB, a metodologia e premissas utilizadas estão no Apêndice II, item VIII.

Da mesma forma que ocorre quando comparado ao custo do diesel, o LCOB comparado às tarifas de gás natural para todos os usos considerados (gás natural para uso industrial, comercial, residencial e automotivo) apresenta viabilidade até no cenário menos competitivo. Na **Figura 10**, a comparação do LCOB é feita com os preços de gás natural, entretanto, estes contêm os impostos, e os valores de LCOB estão sem os impostos.

Como resultado, o LCOB e suas variações de sensibilidade apresentam um custo menor do que o custo do gás natural, considerando as premissas de cada cenário.

Figura 10
Custo nivelado de biometano (LCOB) gerado a partir de biogás de resíduos da bovinocultura de leite 1.000 vacas (sem impostos) comparado às tarifas de gás natural (com impostos).



A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de gás natural é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de gás natural com impostos e tributos em 2020. A referência de preços foi retirada do Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural do mês de outubro de 2020 (MME, 2021).

Nos cenários com produção de biogás e geração de energia elétrica a partir de dejetos de 1.000 vacas em lactação, os resultados-base para a TIR sinalizam viabilidade econômica, consideradas as premissas de cada cenário, ou seja, apresentam-se acima do custo médio ponderado de capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%. Contudo, foi realizada a análise de sensibilidade da TIR em relação às variáveis que possuem maior influência na viabilidade.

A **Figura 11** apresenta os cenários de competitividade da TIR para a geração de energia elétrica. A TIR, nos cenários com geração de energia elétrica, obtida pela análise de viabilidade e, posteriormente, pela análise de sensibilidade, apresenta uma variação entre -6,9%, no cenário menos competitivo, referente ao cenário de autoconsumo da energia (cenário B), e 27,7% no cenário mais competitivo (geração distribuída com autoconsumo remoto, cenário A), com valor de base médio de 13%. O parâmetro que mais influencia a TIR, no cenário mais competitivo e no cenário menos competitivo, é a variação de 40% na receita dos cenários.

Figura 11

Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração de energia elétrica de resíduos da bovinocultura de leite 1.000 vacas e comparação às taxas de retorno de investimento.



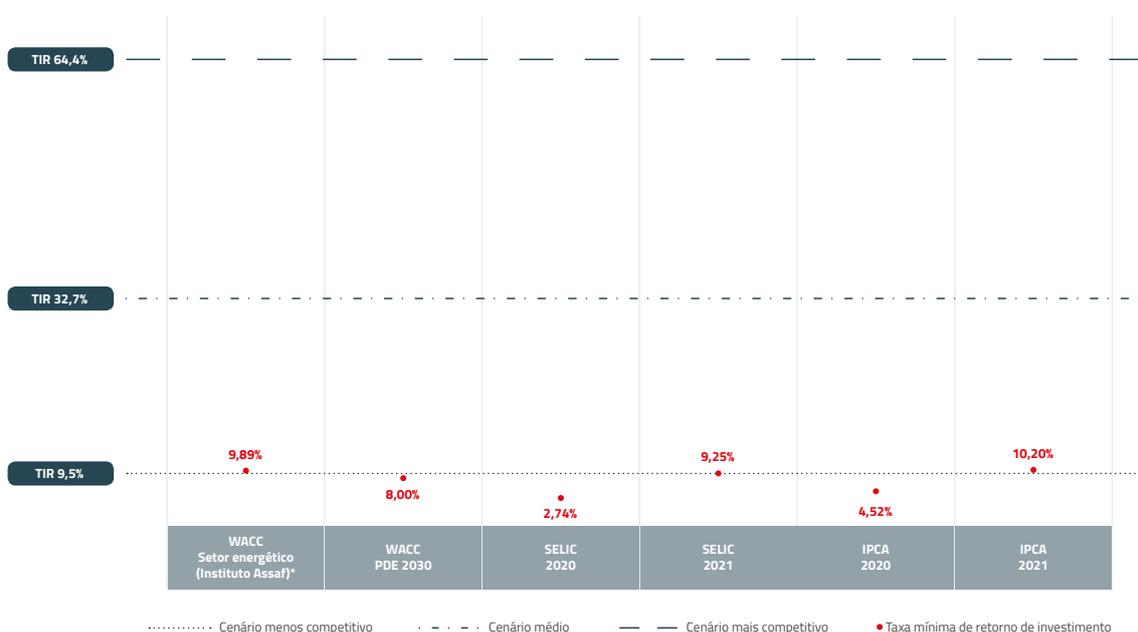
*Setor de energia elétrica (2020).

No cenário menos competitivo, a TIR está abaixo de todas as taxas de retorno e, portanto, não apresenta retorno atrativo do investimento, neste caso. O cenário médio e o cenário mais competitivo mostram viabilidade econômica ao se considerar todas as taxas de retorno apresentadas.

A Lei 14.300/2021, que dispõe sobre o Marco Legal da Geração Distribuída, pode influenciar no parâmetro da receita dos cenários, visto que irá alterar a receita. Nas condições e premissas, aqui consideradas, no cenário A (ver **apêndice V**), a receita do cenário com geração de créditos por geração distribuída com autoconsumo remoto pode ser reduzida em até 10%, contando com uma TIR de 10,2%, ainda acima do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, a partir do qual apresenta rentabilidade para o produtor da energia.

Quanto ao biometano, a variação da TIR é ainda maior, de 9,5% no cenário menos competitivo e 64,4% no cenário mais competitivo. A TIR menos competitiva ocorre na variação para menos de 50% da receita, e a TIR mais competitiva, com a diminuição de 50% no CAPEX.

Figura 12
Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração de biometano de resíduos da bovinocultura de leite 1.000 vacas e comparação às taxas de retorno de investimento.



*Setor de petróleo, gás e biocombustíveis (2020).

O cenário médio e o cenário mais competitivo apresentam TIR acima do custo de capital em todas as taxas apresentadas, conforme a **Figura 12**, o que significa lucratividade, considerando as premissas empregadas. O cenário menos competitivo teria viabilidade econômica somente ao se considerar as menores taxas de retorno.

5

ANÁLISE ECONÔMICA DE BIOGÁS NA INDÚSTRIA: USINA SUCROENERGÉTICA

Nos casos analisados da indústria sucroenergética, foi considerada a produção de biogás a partir da torta de filtro e da vinhaça e foram definidas duas rotas tecnológicas principais para aproveitamento do biogás: de geração de energia elétrica e de biometano. Esse setor foi dividido em dois portes: o caso de pequeno porte, com 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada por ano, e o caso de médio a grande porte, com 3,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada por ano.

5.1 Indústria sucroenergética: 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada anualmente

Na análise econômica da produção de biogás e aproveitamento energético do setor sucroenergético de pequeno porte, foram considerados dois cenários de geração de energia elétrica e dois cenários com biometano: (i) produção de biogás a partir da vinhaça total disponível e torta de filtro, com geração de energia elétrica e aproveitamento dos créditos de energia gerados no modelo de geração distribuída com autoconsumo remoto, grupo tarifário B3, na área de concessão da região Sudeste (cenário A); (ii) produção de biogás a partir de vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com geração de energia elétrica e aproveitamento dos créditos de energia gerados no modelo de geração distribuída com autoconsumo remoto, grupo tarifário B3, na área de concessão da região Sudeste (cenário B); (iii) produção de biogás a partir da vinhaça total disponível e torta de filtro, com *upgrade* para autoconsumo de biometano (25%) em substituição ao diesel na frota, e o excedente (75%) considerado com o preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe (cenário C); (iv) produção de biogás a partir da vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com *upgrade* para autoconsumo de biometano (25%) em substituição ao diesel na frota, e o excedente (75%) considerado com o preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe (cenário D).

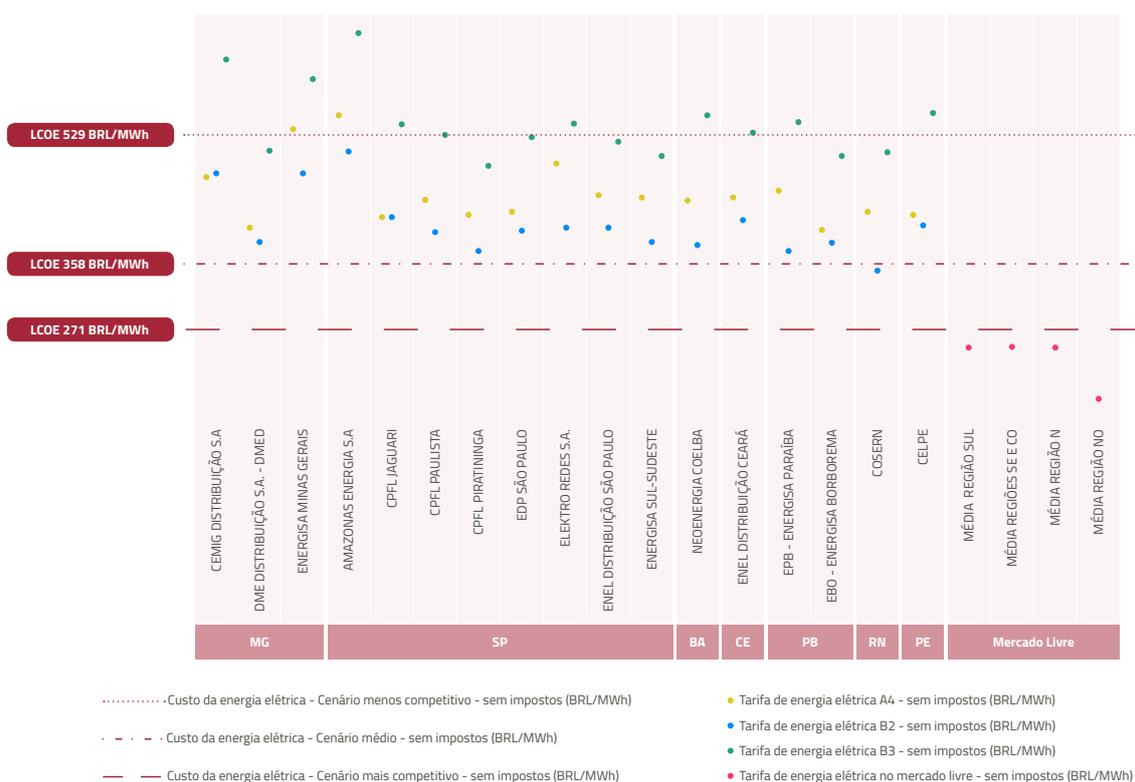
As premissas consideradas e os resultados-base (valor-base) da análise de viabilidade econômica e de sensibilidade, de cada cenário, podem ser consultados nos **Apêndices II e VI**.

Os resultados obtidos na análise de viabilidade foram submetidos a uma análise de sensibilidade, com variações para $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica e variações para $\pm 50\%$ nos cenários com biometano. Os resultados demonstram que o LCOE pode variar entre 271 e 529 BRL/MWh, sendo o valor de base médio de 358 BRL/MWh; e o LCOB, entre 0,78 e 1,83 BRL/m³, com um valor de base médio de 1,08 BRL/m³.

O LCOE mais competitivo foi obtido no cenário com uso de todo volume da vinhaça disponível e torta de filtro para produção do biogás (cenário A), com variação de 40% para menos de OPEX na análise de sensibilidade. No caso do LCOE menos competitivo, o resultado ocorreu no cenário com uso do volume parcial da vinhaça disponível e torta de filtro (cenário B), com uma diminuição de 40% no parâmetro de produtividade e eficiência.

Na **Figura 13**, apresenta-se a análise gráfica da competitividade do LCOE, considerando o preço da energia elétrica dos grupos tarifários A4, B2, B3 e do mercado livre. Nesse gráfico de competitividade, a comparação do LCOE com o preço da energia elétrica não contempla os impostos incidentes na energia elétrica, ou seja, tanto os valores de LCOE quanto das tarifas de energia são valores sem impostos, pois os cenários desse caso de aproveitamento energético dos resíduos da indústria sucroenergética contemplam a modalidade geração distribuída com autoconsumo remoto. Nesse caso, a falta do imposto acaba elevando o retorno econômico, contudo, se fossem acrescidos os impostos nas tarifas de energia elétrica, a competitividade dos cenários se elevaria. Entretanto, a análise de sensibilidade prevê a variação da ausência de imposto na receita e no custo da energia elétrica.

Figura 13
Custo nivelado de energia elétrica (LCOE) gerada a partir de biogás de resíduos da indústria sucroenergética de pequeno porte (sem impostos) comparado às tarifas de energia elétrica (sem impostos)



A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de energia elétrica é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de energia elétrica sem impostos em 2020. Tarifa média para Mercado Livre praticada nos últimos 6 meses de 2020. As estimativas de custos de tarifas de energia elétrica foram obtidas através dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição, realizados pela ANEEL para o ano de 2020.

No cenário mais competitivo, o LCOE seria viável comparado à tarifa de energia no mercado regulado, em todos os estados, exceto quando comparado às tarifas do mercado livre. No cenário menos competitivo, o LCOE seria viável em alguns locais, na maioria da tarifa B3, ou seja, o LCOE é mais competitivo quando comparado às tarifas do mercado regulado, pois, nessa faixa, os cenários teriam um LCOE menor do que o custo de energia praticado.

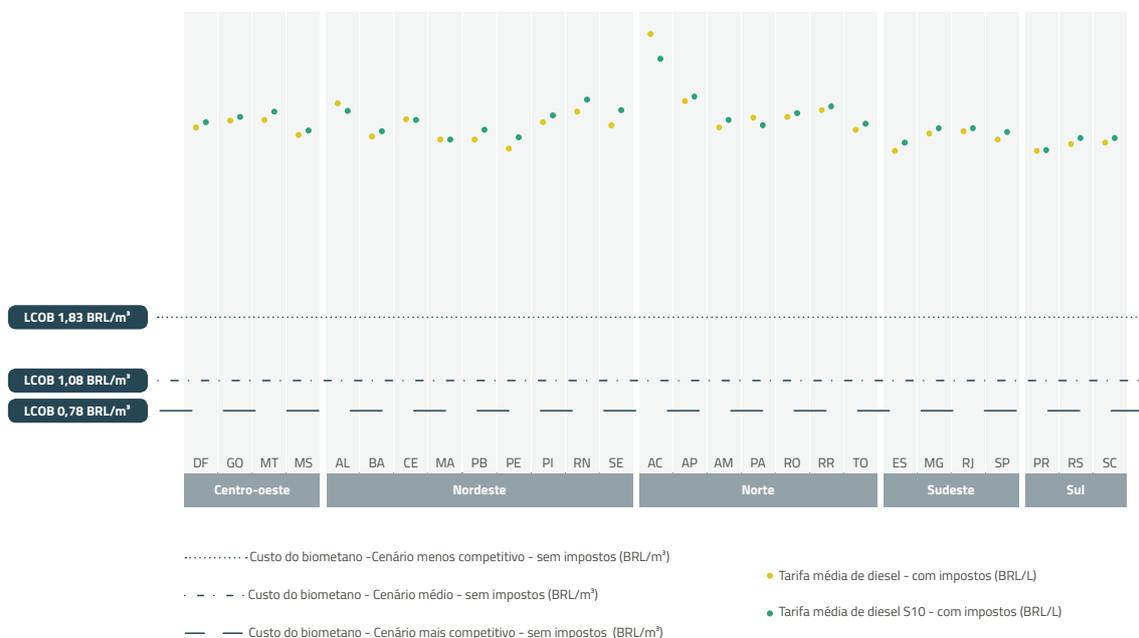
Na geração de biometano, o LCOB mais competitivo foi obtido pela diminuição de 50% do OPEX na análise de sensibilidade. Para o LCOB menos competitivo, a redução em 50% na produtividade e eficiência foi o fator determinante. O LCOB mais competitivo refere-se ao cenário com uso de todo volume da vinhaça disponível e torta de filtro para gerar o biometano (cenário C).

A **Figura 14** apresenta a análise gráfica da competitividade do LCOB, considerando o preço do diesel e diesel S10, para efeitos de substituição do diesel pelo biometano. Os preços do diesel e diesel S10 são preços médios praticados em postos de combustíveis e, portanto, acrescidos de impostos e demais tributos, enquanto os valores de LCOB não contêm impostos. Essa condição eleva a competitividade dos cenários com geração de biometano, e a análise de sensibilidade prevê a variação de imposto na receita e no custo do biometano.

Quando comparado ao preço do diesel e diesel S10, o LCOB seria viável desde o cenário menos competitivo até o mais competitivo. Isso demonstra que o LCOB e suas variações de sensibilidade apresentam um custo menor do que o custo do diesel, considerando as premissas de cada cenário.

Figura 14

Custo nivelado de biometano (LCOB) gerado a partir de biogás de resíduos da indústria sucroenergética de pequeno porte (sem impostos) comparado às tarifas de diesel e diesel S10 (com impostos).



A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de diesel e diesel S10 é apresentado no Apêndice VIII.

Tarifas de diesel com impostos e tributos em 2020.

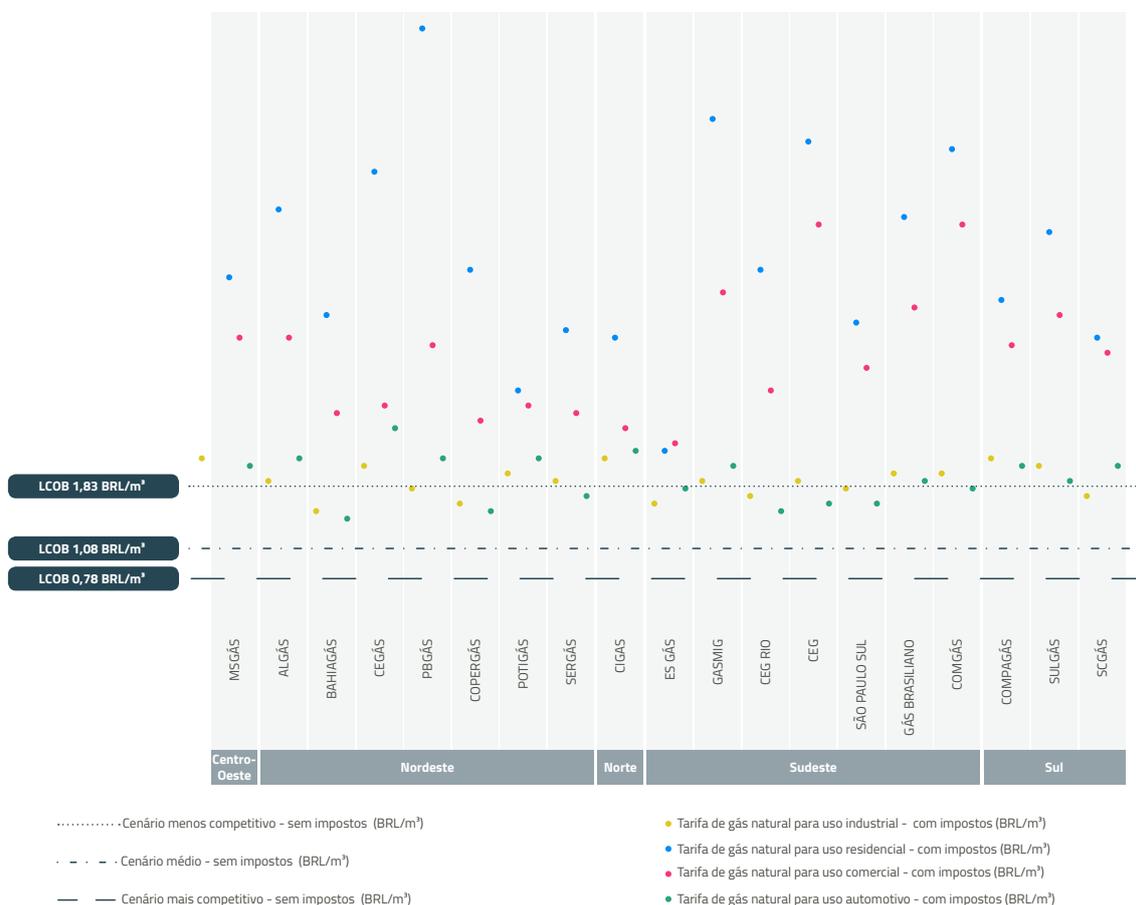
Os custos médios de Diesel e Diesel S10, dos postos de combustível de todos os estados, foram obtidos do Sistema de Levantamento de Preços (SLP) (ANP, 2021), com médias de preços nos períodos de 04/04/21 até 10/04/21.

Na **Figura 15**, apresenta-se a comparação do LCOB com os preços de gás natural (gás natural para uso industrial, comercial, residencial e automotivo), com a finalidade de complementaridade para esse combustível. Os preços do gás natural contêm impostos e os valores de LCOB estão sem os impostos.

Da mesma forma que ocorre quando comparado ao custo do diesel, o LCOB comparado às tarifas de gás natural, para todos os usos considerados, apresenta viabilidade até no cenário menos competitivo, sinalizando que o LCOB e suas variações de sensibilidade apresentam um custo menor do que o custo do gás natural, dentro das premissas consideradas.

Figura 15

Custo nivelado de biometano (LCOB) gerado a partir de biogás de resíduos da indústria sucroenergética de pequeno porte (sem impostos) comparado às tarifas de gás natural (com impostos).



A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de gás natural é apresentado no Apêndice VIII.

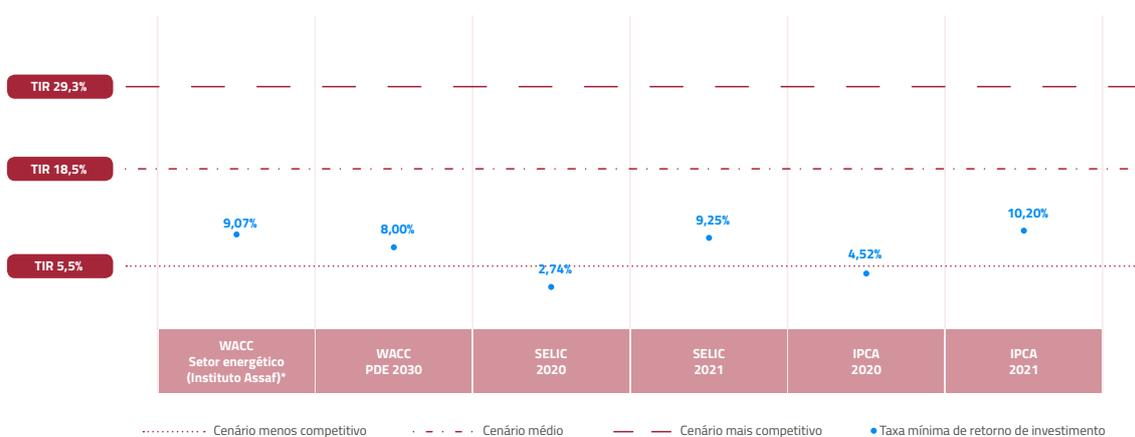
Tarifas de gás natural com impostos e tributos em 2020.

A referência de preços foi retirada do Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural do mês de outubro de 2020 (MME, 2021).

Os resultados-base (cenário médio) para a TIR sinalizam a viabilidade econômica, consideradas as premissas de cada cenário, tanto de energia elétrica quanto de biometano. Todavia, foi realizada a análise de sensibilidade da TIR em relação às variáveis com maior interferência. A TIR, nos cenários com geração de energia elétrica, obtida pela análise de viabilidade e pela análise de sensibilidade, apresenta uma variação entre 5,5% no cenário menos competitivo e 29,3% no cenário mais competitivo, com valor de base médio de 18,5%. O cenário médio e o mais competitivo são viáveis economicamente, em todas as taxas de retorno consideradas. No cenário menos competitivo, a TIR fica abaixo do custo de capital da maioria das taxas de retorno, sinalizando a inviabilidade econômica, nesse cenário, nas condições consideradas. A **Figura 16** apresenta os cenários de competitividade da TIR para a geração de energia elétrica.

Figura 16

Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração de energia elétrica de resíduos da indústria sucroenergética de pequeno porte e comparação às taxas de retorno de investimento.



*Setor de energia elétrica (2020).

Os parâmetros que mais influenciam a TIR, nos cenários com geração de energia elétrica, com variação para menos 40% no cenário mais competitivo, é o CAPEX, e no cenário menos competitivo, é a variação na receita dos cenários. Qualquer alteração nesse parâmetro, como o que contém na Lei 14.300/2021, pode influenciar a receita e, conseqüentemente, a viabilidade. Nas condições e premissas, aqui consideradas, do cenário A (ver **apêndice VI**), a receita pode ter redução de até 30%, ficando acima do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado de capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, a partir do qual apresentará rentabilidade para o produtor da energia.

Quanto ao biometano, apresenta uma TIR de 14,7% no cenário menos competitivo e de 64,1% no cenário mais competitivo, como pode ser observado na **Figura 17**. A TIR mais competitiva ocorreu com redução de 50% do CAPEX, e a TIR menos competitiva, com uma variação de 50% para menos na receita.

Figura 17
Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração biometano de resíduos da indústria sucroenergética de pequeno porte e comparação às taxas de retorno de investimento.



*Setor de petróleo, gás e biocombustíveis (2020).

5.2 Indústria sucroenergética: 3,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processada anualmente

Na análise econômica da produção de biogás e aproveitamento energético do setor sucroenergético de médio a grande porte, foram considerados dois cenários de geração de energia elétrica e dois cenários com biometano.

Os cenários analisados foram: (i) produção de biogás a partir de vinhaça total disponível e torta de filtro, com geração de energia elétrica para venda da energia no modelo de mercado livre de energia, da área de concessão da região Sudeste (cenário A); (ii) produção de biogás a partir da vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com geração de energia elétrica para venda da energia no modelo de mercado livre de energia, da área de concessão da região Sudeste (cenário B); (iii) produção de biogás a partir de vinhaça e torta de filtro, com *upgrade* para autoconsumo de biometano (15%) em substituição ao diesel na frota, e o excedente (85%) considerado com o preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe (cenário C); (iv) produção de biogás a partir de vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com *upgrade* para autoconsumo de biometano (15%) em substituição ao diesel na frota, e o excedente (85%) considerado com o preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe (cenário D).

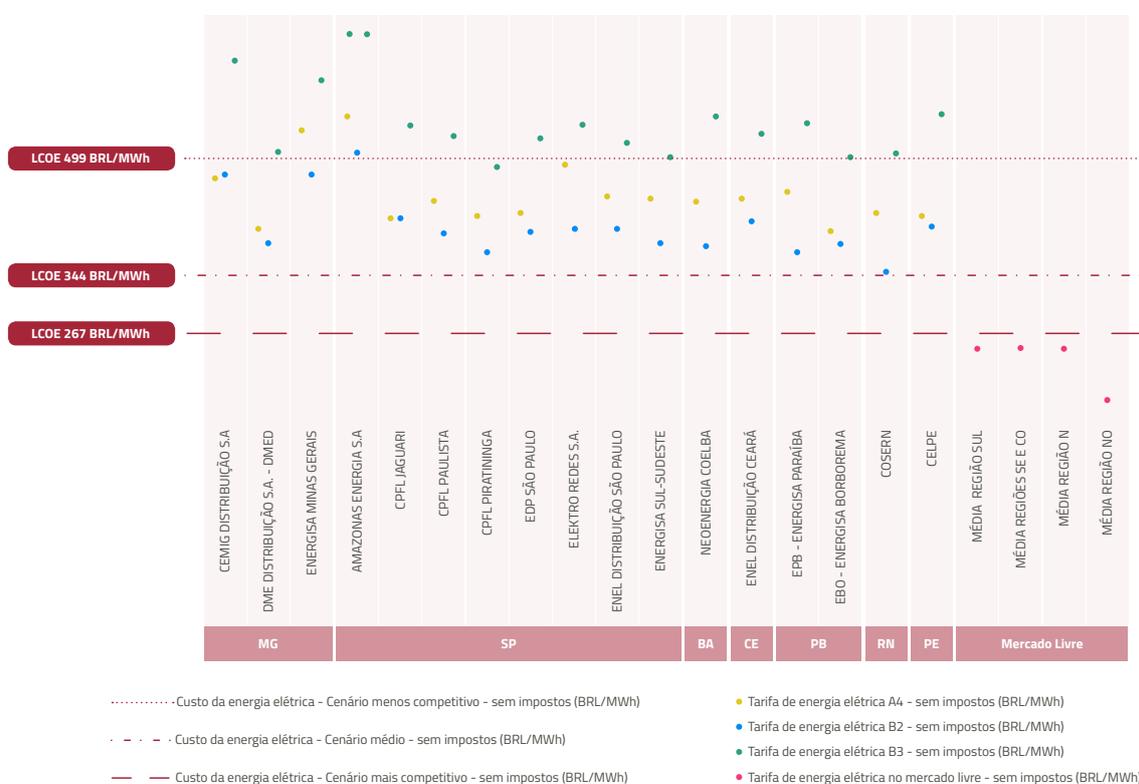
As premissas consideradas e os resultados-base (valor-base) da análise de viabilidade econômica e de sensibilidade, de cada cenário, podem ser consultados nos **Apêndices II e VII**.

Os resultados obtidos na análise de viabilidade foram submetidos a uma análise de sensibilidade, com variações para $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica e variações para $\pm 50\%$ nos cenários com biometano. Estes resultados demonstram que o LCOE pode variar entre 267 e 499 BRL/MWh, com um valor de base médio de 344 BRL/MWh. O LCOB pode variar entre 0,75 e 1,74 BRL/m³, com um valor de base médio de 1,03 BRL/m³.

O LCOE mais competitivo foi obtido no cenário com uso de todo volume da vinhaça disponível e torta de filtro (cenário A), com variação de 40% para menos de OPEX na análise de sensibilidade. No LCOE menos competitivo, o resultado ocorreu no cenário com uso do volume parcial da vinhaça disponível e torta de filtro (cenário B), com diminuição de 40% no parâmetro de produtividade e eficiência.

Na **Figura 18**, apresenta-se a análise gráfica da competitividade do LCOE, considerando o preço da energia elétrica dos grupos tarifários A4, B2, B3 e do mercado livre. Os preços da energia elétrica não contemplam os impostos, ou seja, tanto os valores de LCOE quanto das tarifas de energia são valores sem impostos. Contudo, se fossem acrescidos os impostos nas tarifas de energia elétrica, a competitividade dos cenários se elevaria. Entretanto, a análise de sensibilidade acaba considerando a ausência de imposto na receita e no custo de geração da energia elétrica.

Figura 18
Custo nivelado de energia elétrica (LCOE) produzida a partir de biogás da indústria sucroenergética de médio/grande porte (sem impostos) comparado às tarifas de energia elétrica (sem impostos).



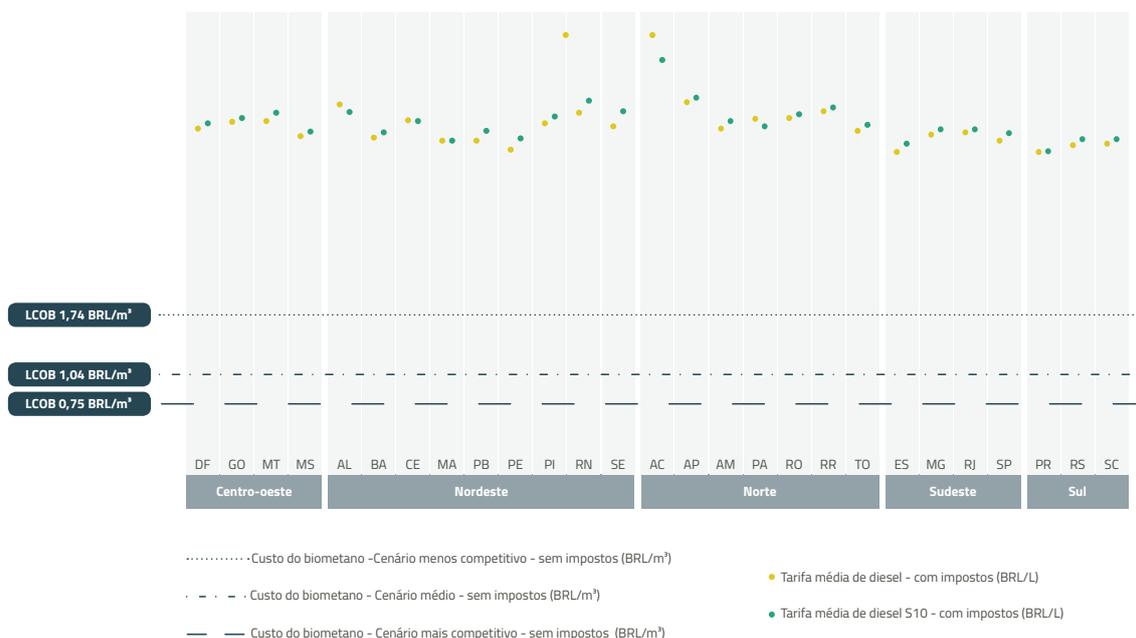
A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de energia elétrica é apresentado no Apêndice VIII.
 Tarifas de energia elétrica sem impostos em 2020. Tarifa média para Mercado Livre praticada nos últimos 6 meses de 2020.
 As estimativas de custos de tarifas de energia elétrica foram obtidas através dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição, realizados pela ANEEL para o ano de 2020.

No cenário mais competitivo, o LCOE seria viável ao ser comparado à tarifa de energia no mercado regulado, em todos os estados, exceto em comparação às tarifas do mercado livre. O cenário menos competitivo apresenta LCOE menor que o custo da energia somente para algumas tarifas, principalmente do grupo tarifário B3. Portanto, comparado às tarifas do mercado livre, o LCOE desses cenários, nas condições consideradas, não apresenta competitividade.

Nos cenários com biometano, o LCOB mais competitivo foi obtido com a diminuição de 50% do OPEX na análise de sensibilidade. Para o LCOB menos competitivo, a redução de 50% na produtividade e eficiência foi o fator que mais influenciou. O LCOB mais competitivo é referente ao cenário com uso de todo volume da vinhaça disponível e torta de filtro para gerar o biometano (cenário C).

A **Figura 19** apresenta a análise gráfica da competitividade do LCOB, considerando o preço do diesel e diesel S10, para efeitos de substituição do diesel pelo biometano. Os preços do diesel e diesel S10 são preços médios praticados em postos de combustíveis e, portanto, acrescidos de impostos e demais tributos, enquanto os valores de LCOB não contêm impostos. Esta condição eleva a competitividade dos cenários com geração de biometano. No entanto, a análise de sensibilidade prevê a variação do imposto na receita e no custo do biometano.

Figura 19
Custo nivelado de biometano (LCOB) gerado a partir de biogás de resíduos da indústria sucroenergética de médio/grande porte (sem impostos) comparado às tarifas de diesel e diesel S10 (com impostos).



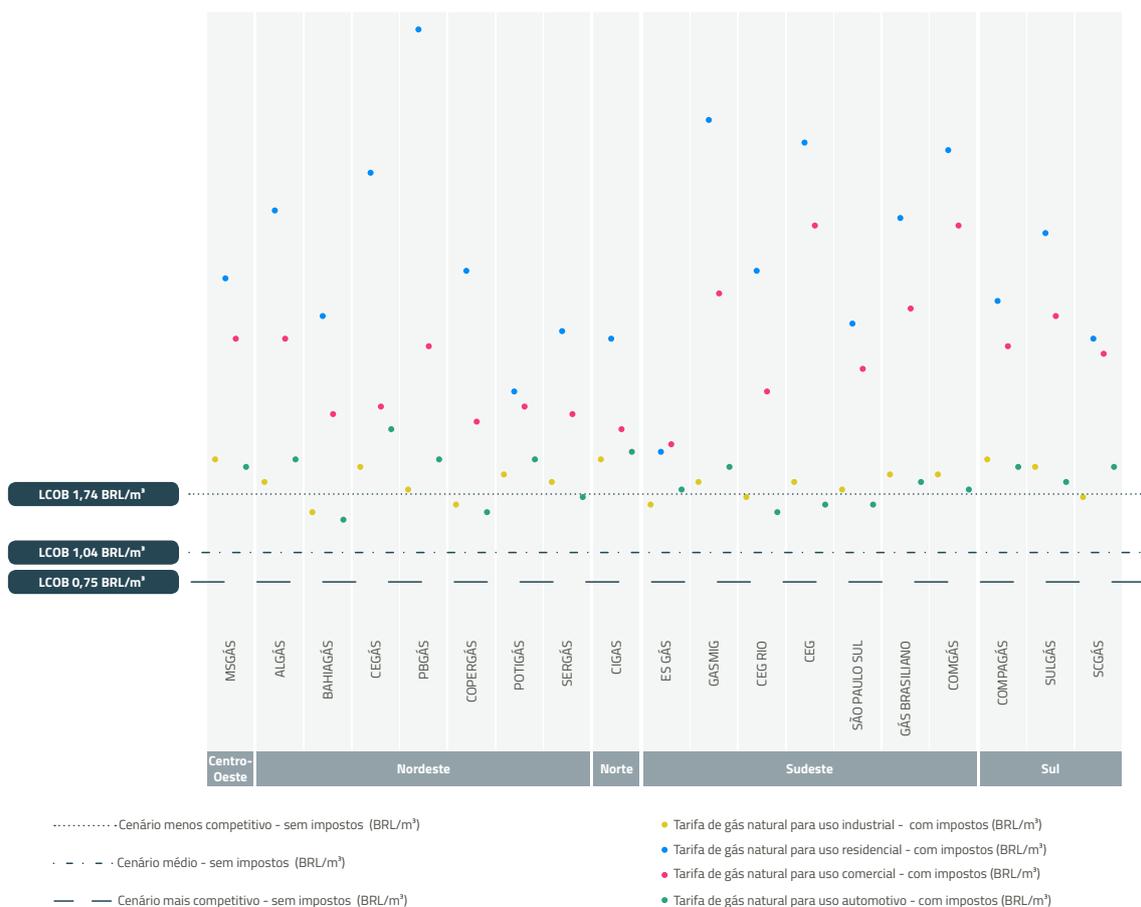
A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de diesel e diesel S10 é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de diesel com impostos e tributos em 2020. Os custos médios de Diesel e Diesel S10, dos postos de combustível de todos os estados, foram obtidos do Sistema de Levantamento de Preços (SLP) (ANP, 2021), com médias de preços nos períodos de 04/04/21 até 10/04/21.

Quando comparado ao preço do diesel e diesel S10, o LCOB seria viável tanto no cenário menos competitivo quanto no mais competitivo. Isso demonstra que o LCOB e suas variações de sensibilidade apresentam um custo menor do que o custo do diesel, considerando as premissas aqui empregadas.

Na **Figura 20**, a comparação do LCOB é realizada com os preços de gás natural (gás natural para uso industrial, comercial, residencial e automotivo). Os preços do gás natural estão acrescidos de impostos e o LCOB está com valor sem imposto.

O LCOB, quando comparado às tarifas de gás natural para todos os usos considerados, apresenta viabilidade no cenário mais competitivo, contudo, no cenário menos competitivo, ou seja, quando o valor do LCOB é maior do que as tarifas consideradas, não é viável em alguns locais com tarifas de gás para uso automotivo e industrial em alguns estados.

Figura 20
Custo nivelado de biometano (LCOB) gerado a partir de biogás de resíduos da sucroenergética de médio/grande porte (sem impostos) comparado às tarifas de gás natural (com impostos).

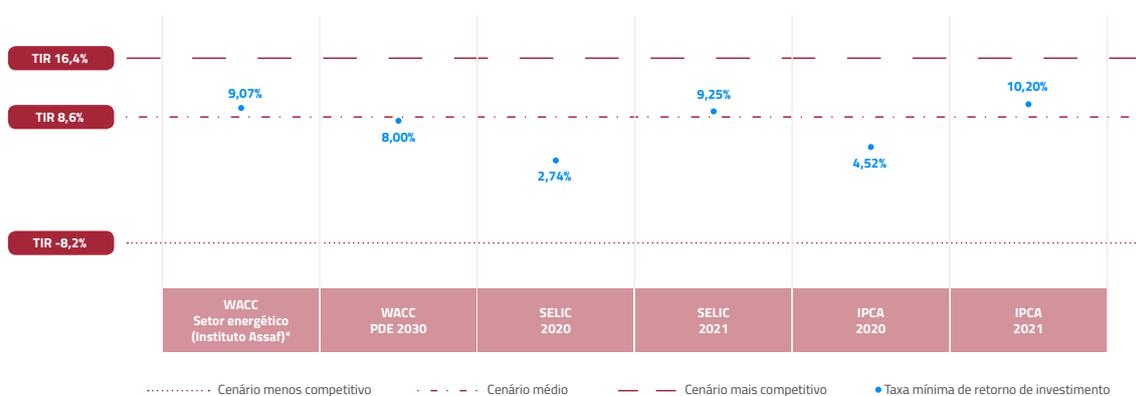


A figura é ilustrativa, o valor das tarifas de gás natural é apresentado no Apêndice VIII. Tarifas de gás natural com impostos e tributos em 2020. A referência de preços foi retirada do Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural do mês de outubro de 2020 (MME, 2021).

O resultado-base (cenário médio) da TIR para a energia elétrica está abaixo do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, e de outras taxas de retorno consideradas. A análise de sensibilidade da TIR, em relação às variáveis que possuem maior influência, apresenta uma variação entre -8,2% no cenário menos competitivo e 16,4% no cenário mais competitivo, com valor de base médio de 8,6%. No cenário menos competitivo, a TIR é negativa e, portanto, não apresenta lucratividade. A **Figura 21** demonstra os cenários de competitividade da TIR para a geração de energia elétrica.

Figura 21

Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração de energia elétrica de resíduos da indústria sucroenergética de médio/grande porte e comparação às taxas de retorno de investimento.



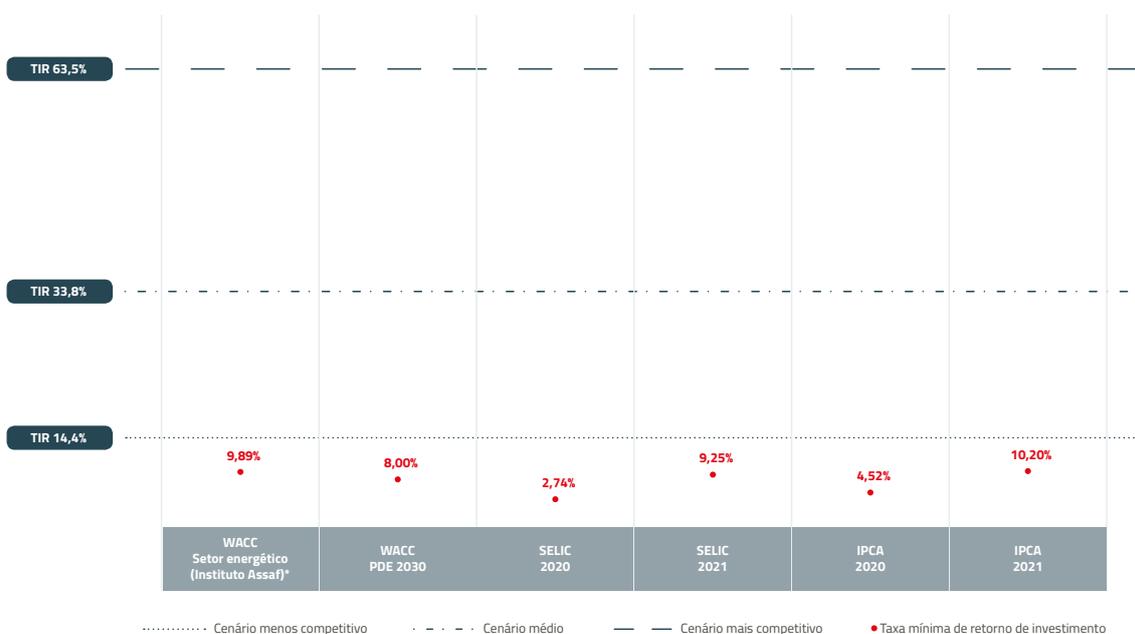
*Setor de energia elétrica (2020).

O parâmetro que mais influencia a TIR, nos cenários com geração de energia elétrica com diminuição de 40% nos cenários, é a receita, aqui composta pelo preço de venda da energia no mercado livre.

Quanto ao biometano, conforme a **Figura 22**, a TIR situa-se em 14,4% no cenário menos competitivo e 63,5%, no cenário mais competitivo. A TIR menos competitiva deve-se à variação de 50% para menos na receita, e a TIR mais competitiva, a diminuição de 50% no CAPEX.

Figura 22

Taxa interna de retorno (TIR) de cenários de geração de biometano de resíduos da indústria sucroenergética de médio/grande porte e comparação às taxas de retorno de investimento.



*Setor de petróleo, gás e biocombustíveis (2020).

Ambos os cenários de competitividade para o biometano apresentam TIR acima do custo de capital em todas as taxas de retorno aplicadas, o que significa lucratividade no cenário de geração de biometano, considerando as premissas utilizadas.

6

CONTRIBUIÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM BIOGÁS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA BRASILEIRA

As análises apresentadas acima indicam várias situações em que os projetos de biogás encontram competitividade. Entretanto, não há solução única para o modelo de negócios no setor de biogás no Brasil, sendo necessário entender os diversos fatores que afetam o desenvolvimento dos variados modelos de negócios, como *stakeholders* locais e diferentes fornecedores de tecnologia. No entanto, dado o potencial de 10,9 bilhões de m³ de biogás para aproveitamento a curto prazo¹³ (INSTITUTO 17, 2021), estimar o mercado em termos de investimentos ajuda a entender os potenciais impactos positivos do desenvolvimento do setor no país.

Assim, uma primeira estimativa é realizada, tendo como base o potencial de produção de biogás a curto prazo (**Figura 23**) e os dados de capacidade e CAPEX dos setores analisados acima (suínos em terminação, bovinos de leite e sucroenergético). As estimativas apresentadas levam em conta os menores e os maiores valores de número de plantas e investimentos, considerando projetos de geração de energia elétrica ou biometano.

¹³ Para conferir os resultados completos do potencial de biogás, a curto prazo, no Brasil, acesse a publicação [Biogás no Brasil: Potencial a curto prazo](#).

Figura 23
Potenciais investimentos no setor de biogás no Brasil¹⁴.

	 Potencial de oferta de energia elétrica (TWh/ano)	OU	 Potencial de oferta de biometano (milhões de Nm ³ /ano)	Potencial número de plantas	Investimento potencial (bilhões de BRL)
Suinocultura em Terminação 	1,69		537	aprox. 1.699 – 1.916	BRL 1,59 – 1,64 bilhões
Bovinocultura de Leite 	0,49		0,16	aprox. 71 – 353	BRL 0,05 – 0,14 bilhões
Indústria Sucroenergética 	15,09		4.805	aprox. 243 – 597	BRL 22,84 – 28,08 bilhões
 TOTAL POTENCIAL	17,27		5.342	aprox. 2.013 – 2.866	BRL 24,48 – 29,86 bilhões

Esses montantes de investimento têm o potencial de desenvolver novas cadeias de valor que podem incorporar fornecedores locais em todo o país. Essas cadeias produtivas seriam compostas por equipamentos e serviços para diversas indústrias, como biodigestores, geradores de energia, equipamentos de atualização de biogás, dutos, veículos leves e pesados a gás, kits de conversão para motores diesel, entre outros.

Esses números representam uma oportunidade considerável para a transição de energia limpa, com impactos importantes para economias locais, empresas, indústrias, produtores e investidores que buscam investimentos em energia limpa e sustentável no Brasil. Por exemplo, o Plano Decenal de Energia 2030 indica um investimento em geração distribuída da ordem de BRL 93 bilhões, com investimentos em biocombustíveis em torno de BRL 68 bilhões e no fornecimento de gás natural, em torno de BRL 95 bilhões. Ainda, a relevância desses números fica mais evidente quando se considera que o potencial, aqui trabalhado, diz respeito a um potencial pronto para ser desenvolvido em cinco anos. Logo, essa comparação sugere que análises mais detalhadas sobre esses investimentos podem ser complementares aos investimentos no desenvolvimento do setor e ao planejamento energético nacional.

¹⁴ As estimativas, aqui apresentadas, não têm como objetivo indicar um número fechado de potencial de investimentos, mas indicar uma ordem de grandeza desses possíveis mercados.

Mais importante ainda, esses investimentos têm o potencial de alavancar ondas de desenvolvimento local em diversas regiões do país. Uma vez que a maior parte dos investimentos localiza-se em regiões rurais, o desenvolvimento desses projetos pode gerar oportunidades para a criação de capacidades locais, a melhoria da renda local e a qualificação de empregos para diversas comunidades. Em curto prazo, a promoção desses investimentos pode atuar de forma a ajudar na recuperação econômica e na criação de empregos em diversas regiões do país, como indicam as análises da IEA ¹⁵.

Obviamente, a captura desses impactos positivos depende de uma combinação de fatores ¹⁶, entre eles, a integração de políticas públicas (incluindo políticas locais) e o desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis por parte de agentes privados (como, por exemplo, seguindo os preceitos da agenda ESG). A evolução dessa agenda de desenvolvimento local tende a afetar algumas das variáveis discutidas nas seções acima. Por exemplo, alguns valores de CAPEX ou OPEX podem variar quando os projetos consideram o treinamento ou a criação de infraestruturas locais para as comunidades envolvidas (mais inclusão social nos benefícios). Dessa fora, a competitividade e o retorno do projeto devem ser avaliados de maneira mais abrangente. Nesse ponto, ainda há necessidade de entender melhor quais indicadores são mais interessantes para uma análise econômica mais abrangente, que pode incorporar questões de gênero, sociais e raciais (e.g. salários ou posições ocupadas, nos projetos, por gênero, nível de educação formal etc.).

¹⁵ A publicação *'Sustainable Recovery'* sugere que medidas de recuperação econômica pós-pandemia devem ser alinhadas às transições energéticas limpas e têm grande potencial de criação de renda e empregos.

¹⁶ Na publicação *Biogás no Brasil: Barreiras e recomendações para o desenvolvimento do setor*, foram destacadas quais são as principais barreiras, o que as causam, seus impactos e quais as possíveis ações a serem tomadas para o desenvolvimento do biogás no Brasil.

7

CONSIDERAÇÕES E PERSPECTIVAS PARA OS MODELOS DE NEGÓCIO EM BIOGÁS NO BRASIL

Os casos e cenários da pecuária e indústria sucroenergética apresentados são hipotéticos, mas foram delineados e baseados em dados reais. Por trás de cada cenário, diversas premissas foram consideradas para se chegar aos resultados aqui apresentados. As análises realizadas são importantes, visto que promovem resultados em busca de uma consolidação de informações econômicas que visam a mitigar a assimetria de informações no setor de biogás no país.

Cenários com geração de energia elétrica se mostram viáveis financeiramente, entretanto, poderiam agregar maior rentabilidade se os atributos (sustentável, armazenável, despacho instantâneo etc.) da geração de energia elétrica a partir do biogás fossem monetizados.

O aproveitamento da energia elétrica na modalidade de geração distribuída apresenta, em geral, uma TIR mais atraente quando comparado ao de cenários com autoconsumo da energia. Isso se deve às tarifas mais elevadas que são praticadas na geração distribuída, o que se apresenta como uma oportunidade para elevar a receita.

Os resultados com geração de biometano, em substituição ao combustível, apresentam taxas de retorno de investimento mais interessantes, quando comparados aos de cenários com geração de energia elétrica, observadas as premissas e considerações. Entretanto, projetos com geração de energia elétrica a partir do biogás são mais consolidados no setor, pois as estruturas regulatória e de mercado são claras. A estrutura regulatória para o biometano ainda requer avanços, sobretudo na estruturação no Mercado Livre de Gás.

Conforme o setor, a escala pode influenciar a TIR tanto negativa como positivamente. Na pecuária, nos casos de bovinocultura de leite, o aumento na escala tornou os cenários mais atrativos. Nos casos da indústria sucroenergética, o aumento na escala baixou a TIR, entretanto, o fator que mais influenciou não foi a escala em si, mas o valor da tarifa de energia praticada, ou seja, a receita. Para projetos de pequeno porte (até 5 MW), o enquadramento na modalidade de geração distribuída é possível e tarifas mais elevadas podem ser praticadas.

Os resultados apresentados são decorrentes de uma análise inicial e estratégica, que busca consolidar dados reais do setor, contudo, ainda é necessária a inclusão de outros aspectos que não foram considerados neste momento. Receitas adicionais, como a cobrança por serviços de tratamento de resíduos, venda de fertilizante a partir do digestato e créditos de carbono podem auxiliar na viabilização de cenários que se mostraram inviáveis ou aumentar a atratividade de projetos que já se confirmaram como viáveis somente com a geração de energia elétrica e biometano.

Os fertilizantes produzidos a partir do digestato são interessantes, pois aproveitam o resíduo orgânico como ativo, assim, possibilitam a obtenção de um produto com alto valor agregado. Atualmente, a prerrogativa usual é a utilização do digestato na fertirrigação, provendo certo valor nutritivo para o solo, mas com o objetivo principal de descarte do resíduo, em conformidade com as normativas ambientais. Portanto, ainda é necessário avanço no mercado interno quanto à valorização do digestato como um insumo para a geração de produtos com potencial de fertilização, pois só então será possível uma análise mais detalhada sobre o uso desse ativo como uma fonte de receita.

Os resultados das análises de viabilidade econômica aqui apresentados, consideradas as incertezas, podem vir a contribuir, de alguma forma, para: a elucidação de questões econômicas relacionadas aos custos e à competitividade de projetos de biogás; atenuar barreiras; e auxiliar na promoção do setor de biogás no país.

8

REFERÊNCIAS

ABINBEV. *Our 2025 Sustainability Goals*. St. Louis, 2020. Disponível em: <https://www.ab-inbev.com/sustainability/2025-sustainability-goals/>.

ABOURIZK, S.M., BABEY, G.M., & KARUMANASSERI, G. *Estimating the cost of capital projects: an empirical study of accuracy levels for municipal government projects*. Canada: Canadian Journal of Civil Engineering, 2002.

AGROPECUÁRIA VALE DO JOTUVA. **Documentos internos - Potencial de produção de biogás na bovinocultura de leite**. Carambeí-PR, Brasil: Agropecuária Vale do Jotuva, 2021.

ANEEL. **Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição**. Brasília/DF, 2021. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/mercado/cativo>.

ANP. **Sistema de Levantamento de Preços (SLP)**. Brasília/DF, 2021. Disponível em: <https://preco.anp.gov.br/>.

CIBIOGÁS, Centro Internacional de Energias Renováveis - Biogás. **Produção de biogás a partir da biodigestão de dejetos suínos em fase de terminação no Oeste do Paraná**. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2018.

DASILVANETO, Jorge Vinicius; GALLO, Waldyr L.R.; NOUR, Edson Aparecido Abdul. *Production and use of biogas from vinasse: Implications for the energy balance and GHG emissions of sugar cane ethanol in the brazilian context*. Nova York, EUA: Environ Prog Sustainable Energy, 2020. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ep.13226>

FINANCIAL TIMES. *ESG demand prompts more than 250 European funds to change tack*. Reino Unido, 2021. Disponível em: <https://www.ft.com/content/e0237f69-a8c8-4bfc-9ccc-c466fb11f401>.

GORDON, J. L. **Black boxing hydro costs**. Montreal, Canadá: Hydro Monenco Consultants Limited, 1989. Disponível em: [https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/109552/3/Black Boxing Hydro Costs 1989 TSpace.pdf](https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/109552/3/Black%20Boxing%20Hydro%20Costs%201989%20TSpace.pdf)

IEA. **IEA-COP26 Net Zero Summit**. Paris, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/events/iea-cop26-net-zero-summit>.

INSTITUTO 17. **Biogás no Brasil: Potencial Oferta a Curto Prazo**. São Paulo/SP: Programa de Energia para o Brasil – BEP (Brasil), 2021.

JBS FOODS. **JBS Makes Global Commitment to Achieve Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2040**. Colorado - EUA, 2021. Disponível em: <https://jbsfoodsgroup.com/articles/jbs-makes-global-commitment-to-achieve-net-zero-greenhouse-gas-emissions-by-2040>.

MME. **Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural**. Brasília/DF, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2020/10-boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-outubro-2020.pdf/view>.

NETO, André Elia et al. **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2009.

RETSCREEN. **Software RETScreen International**. Versão 3rd Ed. Canada: RETScreen, 2005. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465#shr-pg0>

THE WHITE HOUSE. **FACT SHEET: The American Jobs Plan**. Washington D.C.: The White House, 2021. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/03/31/fact-sheet-the-american-jobs-plan/>

UK GOVERNMENT. **The ten point plan for a green industrial revolution**. United Kingdom: UK Government, 2020. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/936567/10_POINT_PLAN_BOOKLET.pdf



APÊNDICE I

ANÁLISE PRELIMINAR DOS CASOS

As análises técnica e econômica proporcionam maior entendimento quanto à viabilidade dos cenários com produção de biogás e geração de energia, assim como, apresentam porte e volume de produção de biogás em consonância ao existente no Brasil.

Foram definidos alguns cenários a partir de cada caso fictício¹⁷ de interesse para a análise econômica de viabilidade inicial, considerando as premissas destacadas a seguir.

I. Definição inicial de casos e rotas tecnológicas

Foi realizada uma análise prévia dos casos relevantes pelo potencial de produção de biogás no país. Para cada setor, foram estipulados diferentes portes ou escalas, requisito essencial para se avaliar a replicabilidade em cada setor. Foram escolhidos os casos de maior porte para uma avaliação inicial, visto que, teoricamente, projetos maiores tendem a ter melhores condições de *payback* e rentabilidade.

De maneira geral, por uma questão de disponibilidade de informações práticas e teóricas, foram analisadas duas rotas tecnológicas para compor a receita dos cenários de biogás: geração de energia elétrica e biometano.

¹⁷ Os casos analisados, neste documento, não consideraram unidades reais, entretanto, as estimativas e análises se basearam em dados reais de produção, operação e manutenção.

II. Levantamento de dados técnicos, econômicos e financeiros

A primeira etapa do levantamento de dados técnicos foi realizada a partir de consulta com profissionais técnicos especialistas da área de aproveitamento de resíduos. Assim, cada caso foi dimensionado conforme a rota tecnológica e propostas de valor. Desse modo, foram dimensionados os equipamentos, os serviços e demais custos envolvidos em cada cenário para aproveitamento energético dos resíduos. Em seguida, foi realizada uma tomada de preço com os principais *stakeholders* envolvidos nas respectivas *supply chains* (biodigestão, geração de energia elétrica, purificação de biogás), para obter os valores de CAPEX e OPEX para cada cenário.

Na sequência, foram avaliadas as receitas disponíveis. Para os casos de aproveitamento de energia elétrica, foram consideradas as tarifas praticadas pelos respectivos mercados (mercado cativo e mercado livre), assim como, para diferentes modalidades de aproveitamento da energia, como geração distribuída, autoconsumo e mercado livre, conforme necessidade de cada cenário. Para os casos com biometano, foram considerados os preços de gás natural e diesel praticados no Brasil.

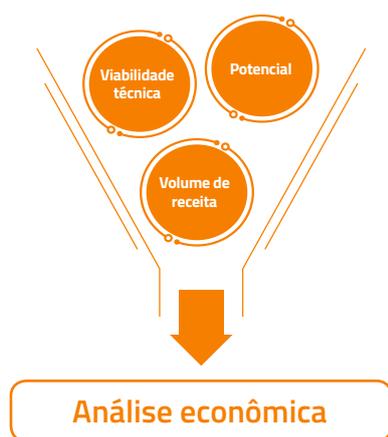
III. Seleção dos casos a partir de análise preliminar

A partir dos casos obtidos na primeira etapa do estudo, foram realizadas análises de viabilidade preliminares para identificar, de forma ampla, quais seriam os casos de maior potencial para uma análise econômica mais detalhada. Primeiramente, todos os casos previamente selecionados foram analisados quanto ao potencial teórico de produção de biogás. Nesse primeiro passo, o principal critério foi a verificação das premissas existentes para as diferentes rotas tecnológicas. Após isso, foi possível passar para a avaliação de critérios técnico-econômicos.

O impacto do dimensionamento para geração de valores das rotas tecnológicas foi outro critério para a continuação da avaliação detalhada dos casos. Baixa produção teórica de biogás necessita de altos custos de investimentos em equipamentos, os quais resultam em retorno econômico insipiente para os cenários. Desse modo, principalmente os casos da pecuária com menor geração de resíduos, ainda que representativos no setor, apresentam receita insipiente ao se considerar as propostas de valor utilizadas, devendo protelar a decisão até que seja efetivada uma análise posterior, que pode ser realizada com base em outras propostas, como o uso de biossólidos, biofertilizante, energia térmica, por exemplo.

Por fim, um critério relevante em uma primeira análise foi o porte dos casos. Geralmente, um porte maior tende a alcançar maior TIR e menor tempo de *payback*. Assim, os primeiros casos analisados, de cada setor, foram os de maior porte. Projetos que não fossem economicamente viáveis em grande porte, possivelmente não o seriam em portes menores. Entende-se, também, que existem outras dificuldades inerentes ao tamanho do porte para cada setor, mas, em um primeiro momento, para selecionar projetos com melhor viabilidade, foram considerados os critérios acima apresentados. A **Figura I** representa, de forma simplificada, a lógica utilizada para o prosseguimento das análises econômicas.

Figura I
Lógica de funil aplicada na análise econômica deste estudo.



Após afunilamento de informação dos casos, foi possível aprofundar as análises. Além dos resultados preliminares, informações mais específicas foram necessárias para melhor avaliar a viabilidade dos cenários, assim como, as diferentes realidades às quais tais cenários estão sendo submetidos. Esses dados estão descritos no **Apêndice II**.

APÊNDICE II

PREMISSAS GERAIS CONSIDERADAS NAS ANÁLISES

A análise econômica do aproveitamento energético dos resíduos pelo biogás permite avaliar a viabilidade baseada em diferentes modelos de negócio e valores de CAPEX e OPEX, para cada cenário. Para tanto, é necessária a definição de premissas que norteiem a análise econômica dos cenários de cada caso. Os casos são aqueles que, conforme análises prévias, obtiveram os melhores potenciais de retorno econômico para resíduos da suinocultura em sistema de terminação, bovinocultura de leite e setor sucroenergético.

I. Estimativa do potencial de produção de biogás

Para realizar as análises econômicas foi necessário utilizar: parâmetros para o dimensionamento dos equipamentos e estruturas para os cenários, fatores de conversão e equivalências energéticas para o biogás. A **Tabela I** mostra os fatores de conversão dos resíduos considerados neste estudo.

Tabela I
Fator de conversão de biogás para os resíduos avaliados.

Setor	Fator de geração de resíduo		Fator de produção de biogás (60% _{CH₄})	
Suinocultura terminação ¹	1,679 m ³ /ano/ animal	0,0046 m ³ /dia/ animal	58,4 Nm ³ /ano/ animal	0,16 m ³ /dia/ animal
Bovinicultura de leite (vacas em lactação em confinamento)	46,02 m ³ /ano/ animal	0,126 m ³ /dia/ animal	309,00 Nm ³ /ano/ animal	0,846m ³ /dia/ animal
Vinhaça de cana-de-açúcar	11,5 m ³ /m ³ / etanol		12,6 Nm ³ /m ³ vinhaça	
Torta-filtro de cana-de-açúcar	30 kg/t/ cana moída		97,5 Nm ³ /t/ torta	

Fonte: (AGROPECUÁRIA VALE DO JOTUVA, 2021; CIBIOGÁS, 2018; DA SILVA NETO; GALLO; NOUR, 2020; NETO et al., 2009)

II. Digestato

Apesar de haver possibilidade de uso do calor gerado no processo de geração de energia elétrica para a secagem do digestato, não se percebeu potencial viabilidade econômica na implementação dos sistemas de secagem. Hoje, no Brasil, o digestato é prioritariamente destinado/aplicado para fertirrigação do solo. Dessa forma, não foram consideradas as tecnologias de secagem nos cenários avaliados.

III. Conversão do biogás em biometano

Para a conversão de biogás em biometano, considerou-se, nas análises, os custos envolvidos com o uso de equipamento para purificação de biogás. Além disso, para os casos de menor porte, tipicamente no setor pecuário, assume-se uma eficiência de conversão de 80% do biometano. Para casos de grande porte, em indústrias com maior probabilidade de retorno do investimento, como é o caso do setor sucroenergético, a eficiência pode alcançar 97% de recuperação do biometano.

Para ser considerado um combustível comercializável, o biometano precisa seguir as especificações estabelecidas pelas Resoluções ANP nº8/2015 e nº685/2017. Entretanto, considerou-se que o biometano usado, nos cenários, passou por um tratamento e pelo processo de purificação, com remoção de impurezas, dióxido de carbono (CO_2) e umidade, garantindo 90% de metano (CH_4) no gás, mas que não se enquadra, necessariamente, como biometano padrão ANP.

IV. Conversão do biogás em energia elétrica

Para a geração de energia elétrica a partir do biogás, foi definido o uso de motogerador como tecnologia de conversão. Os motogeradores são sistemas mais conhecidos e utilizados, além de terem menor custo em comparação com as microturbinas¹⁸, porém, apresentam maior custo de operação e manutenção devido à utilização de óleo lubrificante. O sistema de motogerador possui certa sensibilidade à presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S) no biogás, o que requer um sistema prévio de tratamento do biogás (casos com alta quantidade de H_2S). Para um sistema com motogerador, na grande maioria dos casos, foi assumido um fator de capacidade em torno de 80% para uma operação próxima a 24 horas por dia (com variações entre os cenários), 7 dias por semana, consistente com os tempos de parada e manutenção da tecnologia.

¹⁸ Considerando uma análise econômica da tecnologia de microturbina, optou-se pela não utilização de microturbina nos cenários em função do alto investimento necessário, que apresenta um custo de geração de energia mais alto em comparação com o dos motogeradores.

V. Processo de elaboração e validação dos casos

O dimensionamento dos equipamentos foi realizado por consultores técnicos da área. A partir do dimensionamento dos equipamentos necessários, foi realizada uma tomada de preços e orçamentos com as principais empresas de *supply chain* do mercado de biogás, biodigestão, energia e purificação de biogás.

Após o levantamento dos equipamentos necessários e de o CAPEX e o OPEX serem estimados pelos próprios fornecedores e consultores, foi possível realizar a análise econômica dos cenários de cada caso. Os resultados das análises passaram por um processo de validação com atores do mercado, de cada um dos setores estudados. Os *feedbacks* e as contribuições recebidas nessas validações foram utilizados para ajustes e correções.

VI. Receitas consideradas nos casos

As receitas dos cenários partiram da geração de energia elétrica e biometano. Por não haver um mercado consolidado para biofertilizantes e biossólidos provenientes do digestato, estes não foram considerados como fontes de receita. Da mesma forma, dióxido de carbono, energia térmica e C_{bios} são partes importantes para a geração de valor no projeto, no entanto, pela complexidade e dificuldade na previsibilidade de receita, não foram considerados.

Entende-se que todas as propostas de valor podem influir positivamente para a viabilidade dos cenários. No entanto, pela dificuldade de quantificação de valor e receita, propôs-se considerar apenas aqueles que possuem mercado mais acessível e replicável.

VII. Premissas para as análises econômicas

A título de comparação entre os cenários analisados, preliminarmente, quanto à sua viabilidade econômica, optou-se por não realizar alavancagem financeira, ou seja, foi considerado que os projetos seriam pagos por investimentos próprios, sem empréstimos ou financiamento. Um cenário que já se encontra viável, com TIR positiva acima do custo de capital, possui mais chances de adquirir financiamento e investimento, o que potencializa suas receitas, melhorando o tempo de retorno de investimento tanto para capital próprio quanto para o investidor. Portanto, como a análise de alavancagem é complexa e exige entendimento mais aprofundado de cada caso, tanto de informações financeiras quanto das próprias condições de financiamento, optou-se por não realizar alavancagem nos cenários.

Para as análises de viabilidade econômica, foi assumida uma média de 3,5% de inflação anual. Juros, depreciação e amortizações não foram ponderados nas análises. Além disso, não foram considerados impostos para os cálculos de viabilidade, visto que o arcabouço tributário brasileiro é vasto e complexo, sendo possível diversos abatimentos, dependendo dos modelos de negócios adotados em cada cenário, no âmbito dos casos analisados. Não foram estimados, também, os custos associados a detalhes dos projetos, como tubulações, instalações, pagamento de terceiros para instalação, necessidade de mão de obra, qualificação de mão de obra e demais custos envolvidos com licenciamento ambiental.

Além disso, foi estimada uma margem para EPC (do inglês: *engineering, procurement and construction*), ou seja, engenharia, compras e construção. Para projetos da pecuária com uso de biogás para geração de energia elétrica, tomou-se como parâmetro 30% do CAPEX; e para biometano, devido à maior complexidade e conhecimento menos difundido em relação à energia elétrica, considerou-se 40% do CAPEX. No setor sucroenergético, foi considerado um EPC de 15% em todos os cenários.

VIII. Tarifas de energia e biometano

As estimativas de custos de tarifas de energia elétrica foram obtidas através dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição, realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o ano de 2020. Usou-se, para a comparação, os grupos tarifários do grupo A4, B2, B3 e do Mercado Livre. O valor estimado de tarifa de uso do sistema de distribuição (TUSD) foi de 70,07 BRL/MWh.

A receita dos cenários com geração de energia elétrica é composta pela redução de custos das faturas de energia e, portanto, está atrelada ao preço da tarifa de energia considerada.

O biometano tem possibilidade de venda em *grid* ou como combustível, contanto que tenha os padrões estipulados pela ANP. O biometano dos cenários não se encontra, necessariamente, no padrão da ANP, mas foi considerado o preço do gás natural como balizador do preço do biometano. Além disso, por ter opção de ser usado como gás natural veicular (GNV), também foi considerado como um substituto de combustível diesel. Por isso, é necessário entender a conversão energética do biometano, que, em termos práticos, pode ser assim presumida: 1 metro cúbico de biometano equivale (energeticamente) a um litro de diesel em combustão. Portanto, deve-se observar, também, o preço praticado de diesel, para que seja possível analisar a substituição de diesel por biometano, contanto que o cenário preveja uma reforma nos motores para uso do biometano.

Para os cenários de geração de biometano a partir da pecuária, o cálculo estimado do preço de venda do biometano considerou que:

- 30% do biometano gerado é autoconsumido nos veículos que tiveram a conversão de motores;
- O preço de comparação com autoconsumo é o abate de diesel consumido a um valor de BRL 4,3, conforme tabela de preços da ANP para determinado período (preço médio do estado de MG);
- 70% do biometano é considerado com o preço de GNV (praticado no estado de MG BRL 2,1), descontado um valor de BRL 1,0, referente ao custo de transporte desse mesmo biometano (por m³) em caminhão feixe;
- O cálculo final do preço de venda para os casos de biometano da pecuária é:
Preço de venda = $(4,3 * 0,3) + ((2,1 - 1,0) * 0,7) = \text{BRL } 2,06$

Na indústria sucroenergética, o cálculo estimado do preço de venda do biometano considerou que:

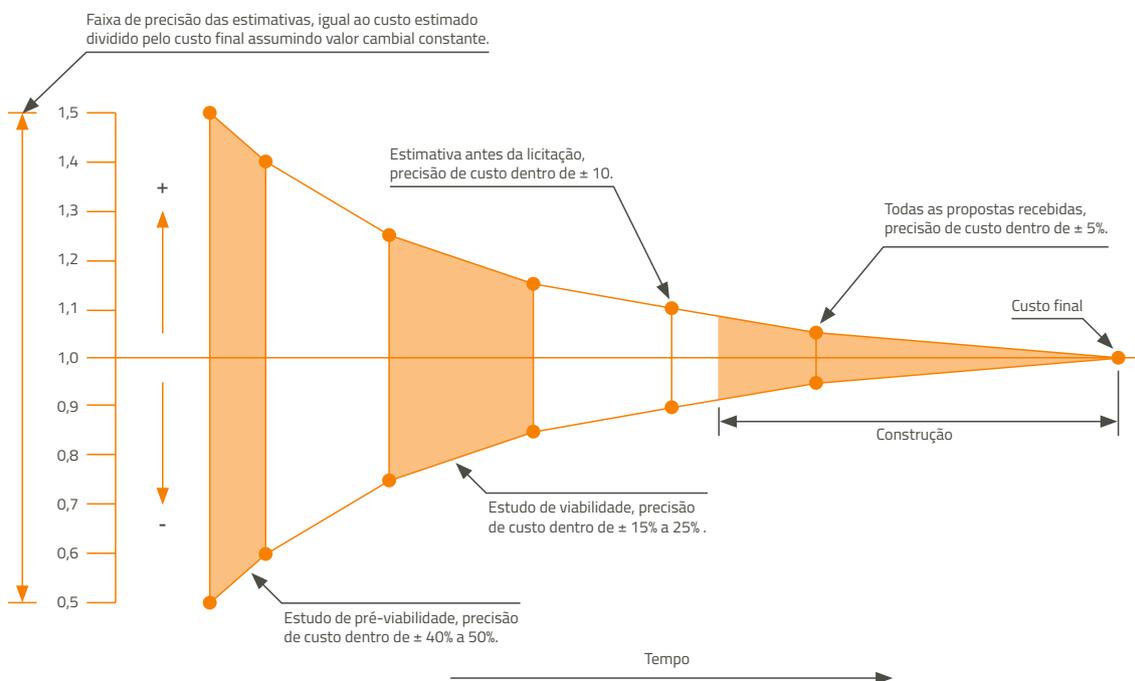
- No caso de pequeno porte, 25% do biometano gerado é autoconsumido, e no caso de médio a grande porte, 15% é autoconsumido nos caminhões que tiveram a conversão do motor;
- O preço de comparação com autoconsumo é o abate de diesel consumido a um valor de BRL 4,0, conforme tabela de preços da ANP para determinado período (preço médio do estado de SP);
- 75% e 85% do biometano gerado é considerado com o preço de GNV, para pequeno e médio a grande porte, respectivamente (praticado no estado de SP BRL 2,5), descontado um valor de BRL 0,25/m³, que é o custo de transporte do biometano;
- Custo de produção do biometano de BRL 0,90/m³ (valor médio de custo de produção definido por consultores especialistas da área)
- O cálculo final do preço de venda para o biometano do setor sucroenergético de pequeno porte é: Preço de venda = $((2,5 - 0,25) * 0,75) + (4 - 0,9) * 0,25 = 2,46 \text{ BRL}$
- O cálculo final do preço de venda para o biometano do setor sucroenergético de grande porte é: Preço de venda = $((2,5 - 0,25) * 0,85) + (4 - 0,9) * 0,15 = 2,38 \text{ BRL}$

IX. Análise de sensibilidade

Em projetos com uso do biogás para aproveitamento energético, a viabilidade econômica pode apresentar graus de incerteza em relação à precisão das estimativas de investimento e dos custos de operação. Por isso, a (RETSCREEN, 2005) indica que o procedimento usual para lidar com essa questão seria avançar com o projeto através de várias etapas: análise de pré-viabilidade, análise de viabilidade, engenharia e desenvolvimento e, por fim, construção e comissionamento.

A ilustração destas etapas consoantes com os respectivos níveis de incerteza pode ser observada na **Figura II**, através do cone de incerteza. O nível de incerteza nas estimativas diminui de $\pm 50\%$ a 0% enquanto o processo de implementação do projeto progride da fase da pré-viabilidade para os estágios finais de construção e comissionamento.

Figura II
 Representação da precisão das estimativas de custos em diferentes estágios do projeto através do cone de incertezas.



Fonte: Adaptado de GORDON, 1989 e RETSCREEN, 2005.

Compreende-se que a fase deste estudo é inicial, de análise de pré-viabilidade, que determina se o projeto proposto tem chance de satisfazer os requisitos de lucratividade e, portanto, se merece os investimentos de tempo e recursos exigidos por uma análise de viabilidade mais completa. Essa fase é caracterizada pelo uso de dados prontamente disponíveis e com estimativas menos precisas de custos.

Ainda em relação à precisão das estimativas de custo em diferentes estágios do projeto, segundo (ABOURIZK et al. 2002), os estudos, aqui realizados, encontram-se na fase estratégica e, portanto, variações de $\pm 50\%$ a 0% são aceitáveis.

Assim, como este é um estudo estratégico, em fase de pré-viabilidade, cujos resultados apresentam algum grau de incerteza, foram realizadas análises de sensibilidade com variações positivas e negativas nos parâmetros mais relevantes (CAPEX, OPEX, produtividade/eficiência e receita para a TIR, LCOE e LCOB dos cenários apresentados).

O CAPEX inclui o investimento em máquinas, equipamentos e instalações, veículos e computadores; o OPEX é composto pelos custos da demanda contratada, O&M variável de energia, O&M variável para tratamento de resíduo, O&M variável para biogás, custos fixos e gastos comerciais; a produtividade e eficiência considera o volume dos resíduos encaminhados para a produção de biogás, o volume de biogás produzido e as horas de operação para gerar energia; e a receita engloba o preço da energia, o preço do tratamento do resíduo e da geração de biogás.

i. Variações dos parâmetros nos cenários com geração de energia elétrica

A variação dos parâmetros dos cenários que geram energia elétrica a partir do biogás foi estipulada em $\pm 40\%$.

- **CAPEX:** Existe uma variação no valor do investimento, considerando-se qualidade e eficiência das máquinas, equipamentos e instalações, bem como, um grau de incerteza dos dados coletados para a modelagem. Há, também, uma variação na disponibilidade de fornecedores nacionais e na disponibilidade regional de serviços, em algumas regiões, o que acarreta variação do preço. Por se tratar de composição de vários equipamentos e por existir uma gama variada de possibilidades e de tecnologias, acaba havendo uma maior possibilidade de variação por opção do investidor, no sentido de opção por eficiência. Pode ocorrer de o CAPEX ser menor e depois ter um OPEX maior, ou seja, não haver uma capacidade de investimento no início e aceitar uma OPEX maior adiante. Justifica-se, assim, uma maior variação do valor de sensibilidade nesse caso, do que nos outros parâmetros de variação (tanto para geração de energia elétrica como para biometano).
- **OPEX:** Os custos de operação e manutenção acompanham a tendência de variação do CAPEX. Essa variação atende também à falta de precisão dos dados utilizados nas modelagens. O custo de aprendizado de quem vai operar a planta pode desencadear variação no valor do OPEX, assim como, a possível contratação de serviços que não estejam disponíveis na região. Tal qual ocorre com o CAPEX, ainda que para os modelos de geração de energia elétrica obteve-se acesso a maior quantidade de dados e especialistas para a validação, foi necessário prever uma margem de erro.
- **Produtividade/eficiência:** A produtividade e a eficiência podem variar com a disponibilidade e a qualidade do resíduo (melhorias nas práticas de manejo, aumento da produtividade da planta/*core business* etc.) para produção do biogás e com horas de operação do sistema, alterações estas que não refletem em um aumento no OPEX ou CAPEX.
- **Receita:** A receita pode se modificar conforme variações no valor das tarifas, impostos e mercado.

ii. Variações dos parâmetros nos casos com geração de biometano

A variação nos cenários que geram biometano a partir do biogás foi definida em $\pm 50\%$.

- **CAPEX:** Variação possível no valor de investimento, considerando-se a qualidade e a eficiência das máquinas, equipamentos e instalações, além de um risco maior em investimento nesse setor. Existe uma variação na disponibilidade de fornecedores nacionais e na disponibilidade regional de serviços, em algumas regiões, o que acarreta variação do preço. Além disso, a possível necessidade de importação de algumas tecnologias e de adaptação de algumas tecnologias pode acarretar variação na composição do investimento. Em relação ao biometano, entende-se que estamos no início da curva de aprendizagem, por isso existe um maior risco de variação de valores. O acesso a especialistas na área, para a validação dos dados, foi mais restrito, quando comparado ao da área de energia elétrica. Por isso, entende-se que a margem de erro deve ser maior do que a considerada nos modelos de geração de energia elétrica.
- **OPEX:** Custos de operação e manutenção acompanham tendência na variação do CAPEX. Idem à justificativa de CAPEX para biometano: mercado em fase inicial da curva de aprendizado. O custo de aprendizado de quem vai operar a planta e a possível contratação de serviços que podem não estar disponíveis na região são fatores que podem causar variação no valor do OPEX. Poucos dados disponíveis e acesso para validação das modelagens. Devido a esses fatores, é necessário considerar maior margem de variação, pois falta precisão dos dados.
- **Produtividade/eficiência:** A produtividade e a eficiência podem variar com a disponibilidade e qualidade do resíduo (melhorias nas práticas de manejo, aumento da produtividade da planta/*core business* etc.) para produção do biogás e com as horas de operação do sistema. Alterações estas que não refletem em um aumento no OPEX ou CAPEX.
- **Receita:** A receita pode se modificar conforme variações no valor das tarifas, impostos e mercado.

APÊNDICE III

CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS NA SUINOCULTURA EM TERMINAÇÃO

I. Rota tecnológica de geração de energia elétrica

Neste arranjo tecnológico de uma unidade não real, considerou-se a utilização de um biodigestor de lagoa coberta (BLC), de tamanho médio de 2.000 m³, pois, com esse volume, o tempo de retenção hidráulica (TRH) dos efluentes no biodigestor é superior a 40 dias, o que colabora para a máxima produção de biogás. O sistema de aquecimento com aproveitamento do calor gerado na conversão de energia elétrica colabora para a operação do biodigestor em faixa mesofílica. Dentre as opções de motogeradores comerciais, optou-se pelo modelo de 330 kVA (~211kW), com consumo médio de 97 m³/h de biogás, com um regime de operação médio de 17 h/dia, definido a partir do volume esperado de geração de biogás. Incluiu-se, também, um sistema de tratamento de biogás para a remoção de H₂S e umidade, pois o biogás proveniente da suinocultura pode apresentar concentrações de H₂S prejudiciais aos motogeradores.

i. Cenários para geração de energia elétrica

O aproveitamento da energia elétrica gerada ocorre por créditos em geração distribuída com autoconsumo remoto ou autoconsumo, no local da geração. Os cenários considerados foram:

- **Cenário A** – Geração de energia elétrica a partir do biogás com tecnologia de conversão por motorgerador, com injeção de energia na rede da distribuidora e geração de receita através dos créditos de energia gerados, no modelo de geração distribuída com autoconsumo remoto. Toda a energia gerada é injetada e consumida por tomador do grupo tarifário B3, dentro da área de concessão da CEMIG, em Minas Gerais. Foi considerada utilização de intermediador comercial para gestão dos créditos, com taxa de 3% de comissão sobre o valor da tarifa B3 e taxa de desconto de energia em 12% para o tomador.
- **Cenário B** – Geração de energia elétrica a partir do biogás, com tecnologia de conversão por motorgerador para a autoconsumo da energia gerada. Toda a energia gerada é consumida pelo gerador, que pertence ao grupo tarifário B2 Rural e que se encontra dentro da rede de distribuição da CEMIG, em Minas Gerais.

As principais definições sobre os cenários de geração de energia elétrica estão na **Tabela II**.

Tabela II

Premissas e dados dos cenários analisados com geração de energia elétrica da suinocultura.

Dados	Cenário A	Cenário B
Sistema de biodigestão	BLC de 2.000 m ³ , com aquecimento do aproveitamento de calor do motorgerador	
Sistema de pré-tratamento do biogás	Remoção de H ₂ S e umidade	
Tecnologia de conversão em energia elétrica	Motorgerador 330 kVA/ 200 kW (17h/dia)	
Fator de capacidade	80%	
Quantidade de resíduo	16.790 m ³ /ano - 46 m ³ /dia	
Produção de biogás	584.000 Nm ³ /ano - 1.600 Nm ³ /dia	
Vida útil	10 anos	
Tipo de aproveitamento	Créditos por Geração Distribuída para autoconsumo remoto	Autoconsumo
Valor da tarifa	0,55286 BRL/kWh	0,4776 BRL/kWh
Categoria da tarifa	B3 com 12% desconto para tomador da energia- CEMIG	B2 Rural - CEMIG

A vida útil considerada na análise foi de 10 anos para os dois cenários. A mesma quantidade de biogás é usada para todos os cenários, assim como, o mesmo percentual de metano no biogás (60% CH₄).

A **Tabela III** apresenta os principais indicadores econômicos obtidos para os cenários com geração de energia elétrica. O cenário com geração de energia elétrica resultou em valores de TIR e VPL positivos para geração distribuída e autoconsumo, indicando sua viabilidade econômica nessa análise inicial.

Tabela III

Principais indicadores econômicos para os cenários com geração de energia elétrica da suinocultura.

Indicador	Cenário A	Cenário B
LCOE (BRL/MWh)	272,70	231,98
TIR	26%	24%
VPL (BRL)	854.755,00	753.879,00
Payback (anos)	4,7	4,9
EBITDA (BRL)	3.561.909,00	3.346.477,00
DMVU* (BRL)	10.284.246,00	8.746.583,00
CAPEX (BRL)	967.915,00	967.915,00
OPEX/ano (BRL)	287.721,00	221.609,00

* Dinheiro movimentado ao longo da vida útil do projeto (soma das receitas, CAPEX e OPEX).

Ambos os cenários apresentam valor de TIR superior ao custo do capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, e, conseqüentemente, um VPL positivo. Assim, nos cenários analisados, o projeto é viável e oferece oportunidade de rentabilidade com geração de energia a partir do biogás. Os cenários A e B apresentam uma boa recuperação do capital investido, com um *payback* de 4,7 e 4,9 anos, respectivamente.

II. Rota tecnológica do biometano

O sistema de biodigestão é equivalente ao da rota tecnológica de geração de energia elétrica. Para a geração de biometano, há sistema para remoção de impurezas, dióxido de carbono (CO₂) e umidade, garantindo 90% de metano (CH₄) no gás. Foi considerada uma eficiência de 80% para os processos de recuperação e purificação do biometano. Para a utilização de biometano enquanto combustível, há necessidade de compressão do gás em cilindros, assim, é necessário um sistema de compressão e armazenamento.

A proposta de receita desse cenário é o abatimento de custo com combustível diesel e o excedente considerado com preço de GNV, com o transporte do mesmo em caminhão feixe, em um raio de 50km. Nesse cenário, foi presumido investimento na conversão de motores e posterior uso do biometano pelo produtor (autoconsumo).

i. Cenário para geração de biometano

Cenário C – Neste cenário, foi considerada a produção de biogás e *upgrade* para autoconsumo de biometano (30%) em substituição ao diesel, e o excedente (70%) considerado com o preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe. O gerador faz o autoconsumo com o combustível veicular em frota própria, com conversão dos motores para aproveitar o biometano (neste caso 2 caminhões e 2 veículos leves).

A **Tabela IV** apresenta os resultados para a geração de biometano a partir do biogás.

Tabela IV

Premissas e dados para o cenário analisado com geração de biometano da suinocultura.

Dados	Cenário C
Sistema de biodigestão	BLC de 2.000 m ³
Quantidade de resíduo	16.790 m ³ /ano - 46 m ³ /dia
Sistema de pré-tratamento do biogás	Compressor para biogás com vazão 80 m ³ /h
Compressão e <i>upgrading</i>	Sistema de <i>upgrading</i> de biogás para biometano com vazão de 80 m ³ /h. Sistema de recompressão de biometano 250 bar
Geração de biometano	280.320 m ³ /ano - 768 m ³ /dia
Vida útil	10 anos
Conversão de frota	2 caminhões e 2 veículos leves
Tipo de aproveitamento	Autoconsumo (30%) substituindo diesel e excedente (70%) com preço de GNV transportando via caminhão feixe
Valor da tarifa	2,06 BRL/m ³
Categoria da tarifa	Preço médio de diesel (BRL 4,3 - MG ANP), preço do GNV, descontado o preço de transporte (BRL 2,10 - MG)

Os resultados dos indicadores para o cenário estão na **Tabela V**. O resultado de TIR mostrou a viabilidade do cenário com biometano, alcançando um valor de 49%; e o VPL também apresentou um valor positivo de BRL 1.871.982,00, superior ao dos cenários de aproveitamento de energia elétrica

Tabela V

Principais indicadores econômicos para o cenário com geração de biometano da suinocultura.

Indicador	Cenário C
LCOB (BRL/m ³)	0,55
TIR	48,5%
VPL (BRL)	1.871.982,00
<i>Payback</i> (anos)	3,1
EBITDA (BRL)	5.709.484,00
DMVU* (BRL)	8.669.966,00
CAPEX (BRL)	830.648,00
OPEX/ano (BRL)	106.491,00

* Dinheiro movimentado ao longo da vida útil do projeto (soma das receitas, CAPEX e OPEX).

Pelo baixo valor de *payback*, o cenário apresenta menor risco quando comparado aos cenários com energia elétrica, com 3,1 anos para retorno do investimento.

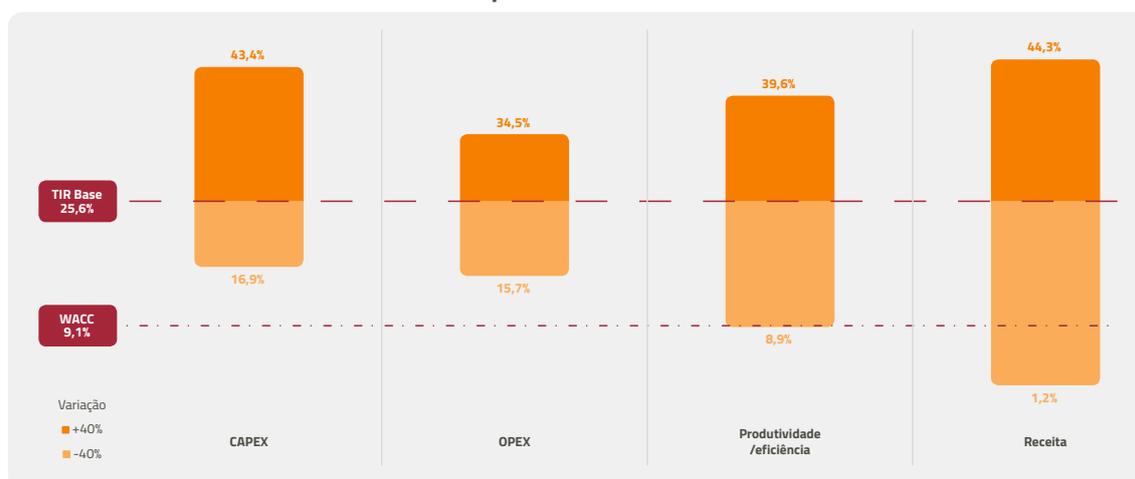
III. PROPOSTAS DE SENSIBILIDADE PARA TIR, LCOE E LCOB

Os resultados-base dos cenários da suinocultura foram analisados para verificar quão sensíveis são as variações na TIR, LCOE e LCOB, considerando-se as variações percentuais de $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica e $\pm 50\%$ no cenário com geração de biometano, para os parâmetros CAPEX, OPEX, receita e produtividade/eficiência.

i. CENÁRIO A – geração distribuída com autoconsumo remoto

Neste cenário, o impacto na variação da receita é mais significativo do que os impactos em CAPEX, OPEX e produtividade e eficiência (*Figura III*). Com uma diminuição de 40% na receita, a TIR fica muito abaixo do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%. Além disso, diminuindo a produtividade e eficiência em 40%, a TIR também apresentaria um cenário sem lucratividade.

Figura III
Análise de sensibilidade da TIR do cenário A para suinocultura.



De acordo com a *Figura IV*, o maior impacto no LCOE é atribuído ao OPEX. Assim, uma queda de 40% no OPEX poderia reduzir o LCOE em até 202 BRL/MWh, aumentando, potencialmente, a rentabilidade e a TIR do cenário.

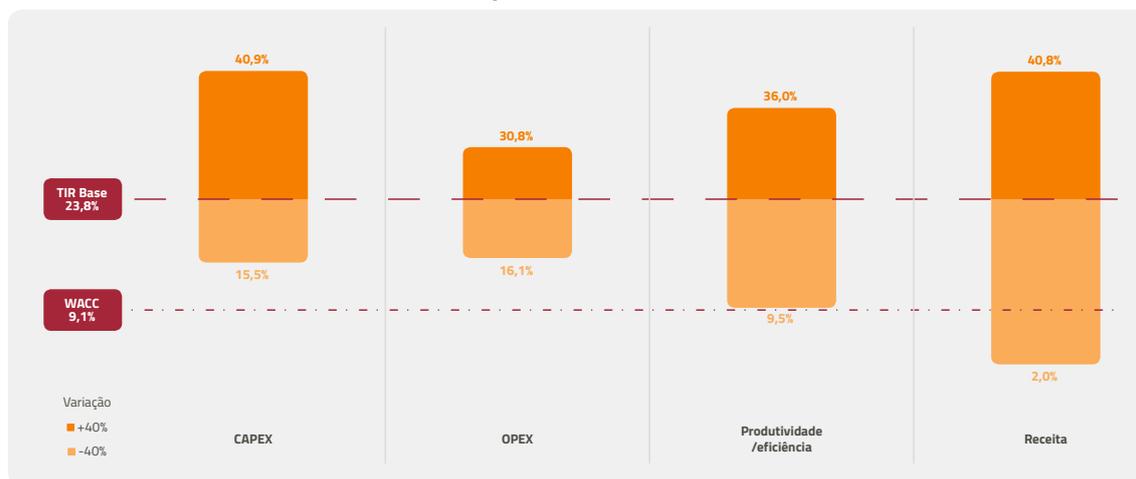
Figura IV
Análise de sensibilidade para LCOE do cenário A para suinocultura.



ii. CENÁRIO B – autoconsumo local

No cenário B, o maior impacto da variação, na análise, é na receita, conforme **Figura V**. Com uma alteração de menos 40% na receita, a TIR fica muito abaixo do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, indicando que, nessas condições, não há lucratividade. Entretanto, se houver uma redução de 40% nos outros parâmetros, a TIR ainda se mantém acima do custo de capital.

Figura V
Análise de sensibilidade da TIR do cenário B para suinocultura.



A intenção é obter um valor de LCOE reduzido, pois, quanto menor esse valor, mais competitiva é a energia gerada. No cenário B, a diminuição do OPEX resulta em LCOE mais baixo, sendo possível alcançar um valor de 177 BRL/MWh, conforme observado na **Figura VI**.

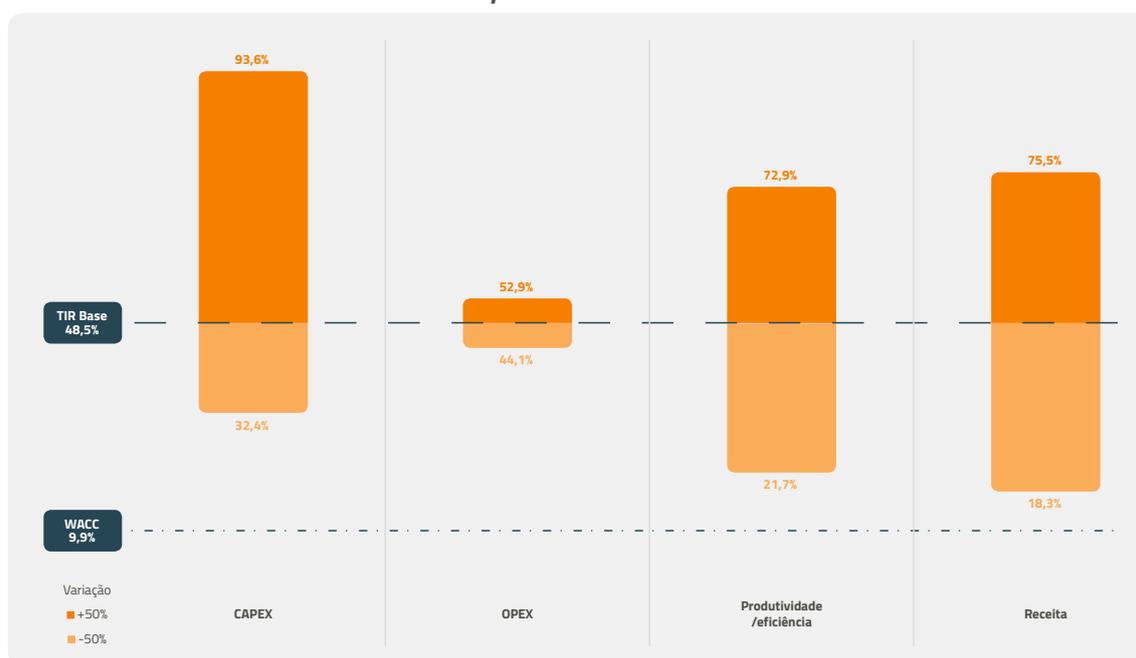
Figura VI
Análise de sensibilidade para LCOE do cenário B para suinocultura.



iii. CENÁRIO C – biometano

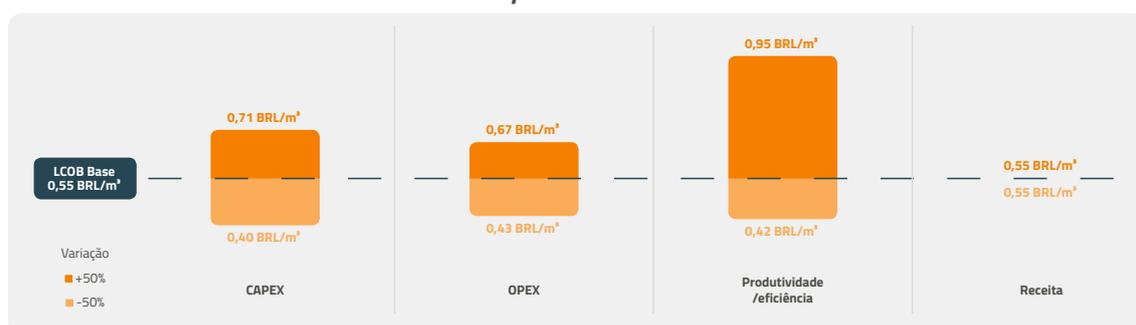
No cenário C, apresentado na **Figura VII**, referente à geração de biometano na suinocultura, ao se considerar a variação na TIR, todos os parâmetros com variação para ±50% continuam viáveis, apresentando TIR positiva acima do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de petróleo, gás e biocombustíveis, no valor de 9,89%. O maior impacto é na variação do CAPEX, isto é, uma diminuição de 50% elevaria a TIR a 93,6%.

Figura VII
Análise de sensibilidade da TIR do cenário C para suinocultura.



Para o LCOB da **Figura VIII**, o parâmetro CAPEX apresenta-se como fator de maior influência para a diminuição do valor na análise de sensibilidade, chegando a um custo de 0,40 BRL/m³ de biometano, neste cenário na suinocultura.

Figura VIII
Análise de sensibilidade do LCOB do cenário C para suinocultura.



APÊNDICE IV

CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS NA BOVINOCULTURA DE LEITE – 500 ANIMAIS EM LACTAÇÃO

I. Rota tecnológica de geração de energia elétrica

Este arranjo tecnológico considerou, nas simulações, um biodigestor lagoa coberta (BLC) de 2.000 m³. Com esse volume, o tempo de retenção hidráulica (TRH) dos efluentes no biodigestor é superior a 40 dias. Para o volume de biogás produzido, o motorgerador é de 50 kVA, com consumo de 20 m³/h de biogás e um funcionamento de 21 h/dia. Incluiu-se sistema de tratamento de biogás para remoção de H₂S e umidade.

i. Cenários para geração de energia elétrica

Neste caso, com um plantel de 500 vacas em lactação, foram analisados 2 cenários com geração de energia como fonte de receita. Os cenários analisados foram:

- **Cenário A** – Produção de biogás com geração de energia elétrica a partir de tecnologia de conversão com motorgerador, para a injeção de energia na rede da distribuidora e obtenção de receita através dos créditos de energia gerados, no modelo de geração distribuída para autoconsumo remoto. Para o processo de geração distribuída, foi considerado que: toda a energia gerada é injetada na rede de distribuição; o tomador da energia é do grupo tarifário B3; a utilização de intermediador comercial para gestão dos créditos, com taxa de 3% de comissão sobre o valor da tarifa B3 e taxa de desconto de energia em 12% para o tomador; e tanto o gerador quanto o consumidor da energia estão dentro da área de concessão da CEMIG, em Minas Gerais;
- **Cenário B** – Produção de biogás com geração de energia elétrica a partir de tecnologia de conversão com motorgerador, para a autoconsumo da energia gerada. Para o cenário de autoconsumo, foi considerado que: toda a energia gerada é consumida pelo gerador; o gerador da energia pertence ao grupo tarifário B2 Rural; e a propriedade rural encontra-se dentro da rede de distribuição da CEMIG, em Minas Gerais.

As principais definições sobre os cenários de geração de energia elétrica estão na **Tabela VI**.

Tabela VI

Premissas e dados para os cenários com geração de energia elétrica analisados da bovinocultura - 500 vacas.

Dados	Cenário A	Cenário B
Sistema de biodigestão	BLC de 2.000 m ³	
Sistema de pré-tratamento do biogás	Remoção de H ₂ S e umidade	
Tecnologia de conversão em energia elétrica	Motogerador 50 kVA/ 32 kW (21h/dia)	
Fator de capacidade	80%	
Quantidade de resíduo	23.010m ³ /ano - 63 m ³ /dia	
Produção de biogás	154.588 Nm ³ /ano - 423 Nm ³ /dia	
Vida útil	10 anos	
Tipo de aproveitamento	Créditos por Geração Distribuída para autoconsumo remoto	Autoconsumo
Valor da tarifa	0,55286 BRL/kWh	0,4776 BRL/kWh
Categoria da tarifa	B3 com 12% desconto para tomador da energia- CEMIG	B2 Rural - CEMIG

A vida útil considerada na análise foi de 10 anos para os dois cenários. A mesma quantidade de biogás é usada para os cálculos dos cenários A e B, assim como, o mesmo percentual de metano no gás (60% CH₄).

A **Tabela VII** apresenta os principais resultados econômicos. Ambos os cenários apresentam valores de VPL negativos, mas com *payback* abaixo do tempo de vida útil do projeto (10 anos). A TIR encontra-se abaixo do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, um indicativo de inviabilidade inicial desses cenários, nas condições apresentadas.

Tabela VII

Principais indicadores econômicos para os cenários com geração de energia elétrica da bovinocultura - 500 vacas.

Indicador	Cenário A	Cenário B
LCOE (BRL/MWh)	396,84	361,61
TIR	7%	5%
VPL (BRL)	-35.760,00	-63.947,00
<i>Payback</i> (anos)	8,2	8,7
EBITDA (BRL)	628.686,00	568.490,00
DMVU* (BRL)	2.309.660,00	2.023.362,00
CAPEX (BRL)	393.000,00	393.000,00
OPEX/ano (BRL)	64.398,00	53.093,00

* Dinheiro movimentado ao longo da vida útil do projeto (soma das receitas, CAPEX e OPEX).

II. PROPOSTAS DE SENSIBILIDADE PARA TIR, LCOE E LCOB

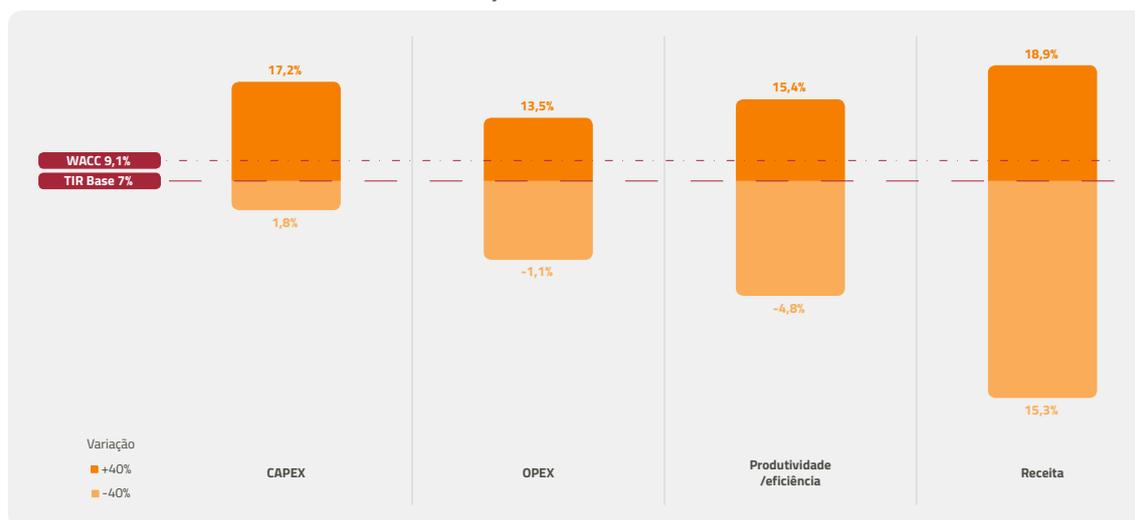
Os resultados-base dos cenários da bovinocultura de leite com 500 vacas em lactação foram analisados para verificar quão sensíveis são as variações na TIR e LCOE, considerando as variações percentuais de $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica, para os parâmetros CAPEX, OPEX, receita e produtividade/eficiência.

i. CENÁRIO A – geração distribuída com autoconsumo remoto

A TIR do cenário-base encontra-se abaixo do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, entretanto, é necessário um aumento na receita, que é vinculada ao valor da tarifa da energia elétrica. A receita é considerada, aqui, o parâmetro mais impactado para que o cenário apresente maior lucratividade, conforme observado na **Figura IX**. Com uma variação para mais 40% na receita, a TIR do cenário passaria a 18,9%, acima do custo de capital.

Figura IX

Análise de sensibilidade da TIR do cenário A para bovinocultura – 500 vacas.



A análise de sensibilidade para o LCOE (**Figura X**) mostra que o fator com maior influência é a redução do parâmetro OPEX, sendo assim possível alcançar um valor mínimo de 317 BRL/MWh neste cenário.

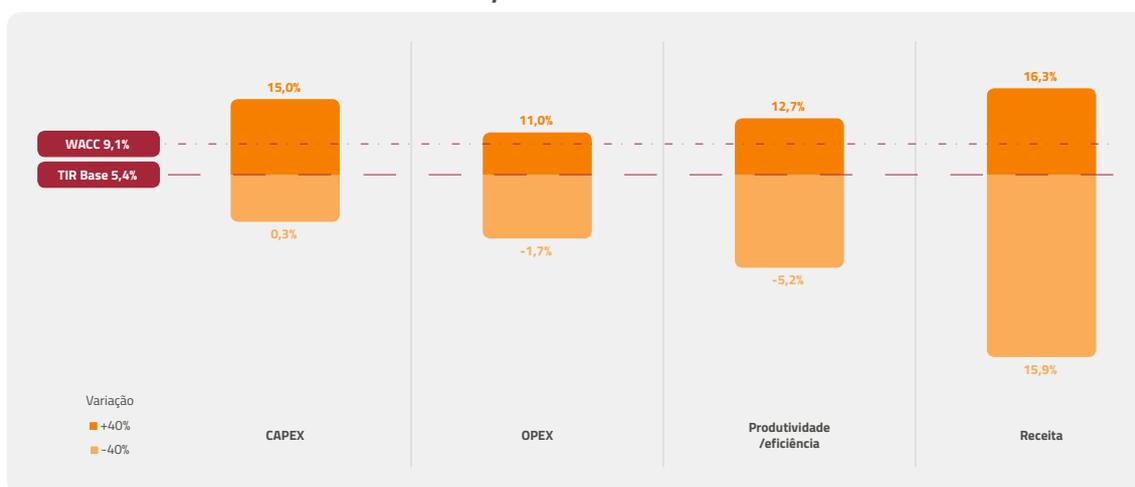
Figura X
Análise de sensibilidade do LCOE do cenário A para bovinocultura – 500 vacas.



ii. CENÁRIO B – autoconsumo local

Como o resultado-base da TIR parte abaixo do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, o incremento em qualquer fator melhoraria a TIR, entretanto, a receita, que é determinada pelo preço da energia, é o fator que mais a impacta quando aumenta em 40%, chegando a 16,3%, conforme **Figura XI**.

Figura XI
Análise de sensibilidade da TIR do cenário B para bovinocultura – 500 vacas.



Quando a energia gerada é consumida localmente, nas condições apresentadas nesse cenário, conforme a **Figura XII**, a melhor condição ocorre com a redução de 40% do CAPEX, chegando a um valor de LCOE de 283 BRL/MWh.

Figura XII
Análise de sensibilidade do LCOE do cenário B para bovinocultura – 500 vacas.



APÊNDICE V

CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS NA BOVINOCULTURA DE LEITE – 1.000 ANIMAIS EM LACTAÇÃO

I. Rota tecnológica de geração de energia elétrica

O biodigestor lagoa coberta (BLC) possui 4.000 m³. Com esse volume, o tempo de retenção hidráulica (TRH) dos efluentes no biodigestor é superior a 40 dias. A tecnologia de conversão em energia é o motorgerador de 100 kVA, com funcionamento estimado em 22 h/dia. Incluiu-se sistema de tratamento de biogás para remoção de H₂S e umidade do biogás.

i. Cenários para geração de energia elétrica

Para a bovinocultura de leite com 1.000 vacas em lactação, foram analisados 2 cenários com geração de energia elétrica como fonte de receita. O aproveitamento da energia elétrica gerada ocorre ou por créditos em geração distribuída com autoconsumo remoto ou autoconsumo no local da geração.

Os cenários analisados foram:

- **Cenário A** – Produção de biogás com geração de energia elétrica a partir de tecnologia de conversão por motorgerador, para a injeção de energia na rede da distribuidora e geração de receita através dos créditos de energia gerados, no modelo de geração distribuída por autoconsumo remoto. Para o processo de geração distribuída foi considerado que: toda a energia gerada é injetada na rede de distribuição; o tomador da energia é do grupo tarifário B3; a utilização de intermediador comercial para gestão dos créditos, com taxa de 3% de comissão sobre o valor da tarifa B3 e taxa de desconto de energia em 12% para o tomador; e tanto o gerador quanto o consumidor da energia estão dentro da área de concessão da CEMIG, em Minas Gerais;

- **Cenário B** – Produção de biogás com geração de energia elétrica a partir de tecnologia de conversão por motogerador, para autoconsumo da energia gerada. Para o cenário de autoconsumo, foi considerado que: toda a energia gerada é consumida pelo gerador; o gerador da energia pertence ao grupo tarifário B2 Rural; a propriedade rural encontra-se dentro da rede de distribuição da CEMIG, em Minas Gerais.

As principais definições sobre os cenários de geração de energia elétrica estão na **Tabela VIII**.

Tabela VIII

Premissas e dados para os cenários analisados com geração de energia elétrica da bovinocultura - 1.000 vacas

Dados	Cenário A	Cenário B
Sistema de biodigestão	BLC de 4.000 m ³	
Sistema de pré-tratamento do biogás	Remoção de H ₂ S e umidade	
Tecnologia de conversão em energia elétrica	Motogerador 100 kVA/ 75 kW (22 h/dia)	
Fator de capacidade	80%	
Quantidade de resíduo	46.020 m ³ /ano – 126 m ³ /dia	
Produção de biogás	309.176 m ³ /ano – 847 m ³ /dia	
Vida útil	10 anos	
Tipo de aproveitamento	Créditos por Geração Distribuída para autoconsumo remoto	Autoconsumo
Valor da tarifa	0,55286 BRL/kWh	0,4776 BRL/kWh
Categoria da tarifa	B3 com 12% desconto para tomador da energia – CEMIG	B2 Rural – CEMIG

A vida útil considerada, na análise, foi de 10 anos para os dois cenários. A mesma quantidade de biogás é usada para os cálculos dos cenários A e B, assim como o mesmo percentual de metano no gás (60% CH₄).

A **Tabela IX** apresenta os principais resultados obtidos para os cenários com geração de energia elétrica. Ambos os cenários apresentam TIR acima do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, valor de VPL positivos e *payback* abaixo do tempo de vida útil do projeto (10 anos), indicadores estes que mostram a viabilidade dos cenários com geração de energia elétrica, no âmbito das premissas consideradas.

Tabela IX

Principais indicadores econômicos para os cenários com geração de energia elétrica da bovinocultura – 1.000 vacas.

Indicador	Cenário A	Cenário B
LCOE (BRL/MWh)	329,35	295,18
TIR	14%	12%
VPL (BRL)	181.473,00	108.352,00
<i>Payback</i> (anos)	6,4	6,8
EBITDA (BRL)	1.714.605,00	1.558.446,00
DMVU* (BRL)	5.274.829,00	4.580.221,00
CAPEX (BRL)	739.700,00	739.700,00
OPEX/ano (BRL)	141.026,00	114.103,00

* Dinheiro movimentado ao longo da vida útil do projeto (soma das receitas, CAPEX e OPEX).

II. Rota tecnológica do biometano

O sistema de biodigestão proposto é o mesmo para os cenários com energia elétrica. Para a geração de biometano, há um sistema para remoção de impurezas, CO₂ e umidade, o que garante 90% de CH₄ no gás. Foi considerada uma eficiência de 80% para os processos de recuperação e purificação do biometano. Para a utilização de biometano, há a necessidade de compressão do gás em cilindros, o que facilita o uso do combustível.

A proposta de receita desse cenário é o abatimento de custo com combustível diesel e o excedente considerado com preço de GNV, com o transporte do mesmo em caminhão feixe, em um raio de 50km. Nesse cenário, foi presumido investimento na conversão de motores e posterior uso do biometano pelo produtor (autoconsumo).

i. Cenários para geração de biometano

Cenário C – Produção de biogás e *upgrade* para autoconsumo de biometano (30%) em substituição ao diesel, e o excedente (70%) considerado com o preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe. O produtor, cuja propriedade se encontra em Minas Gerais, faz o autoconsumo como combustível veicular em frota própria, com conversão dos motores para aproveitar o biometano (1 caminhão e 1 veículo leve).

Tabela X

Premissas e dados do cenário analisado para geração de biometano da bovinocultura – 1.000 vacas.

Dados	Cenário C
Sistema de biodigestão	BLC de 4.000 m ³
Quantidade de resíduo	46.020 m ³ /ano - 126 m ³ /dia
Sistema de pré-tratamento do biogás	Compressor para biogás com vazão 40 m ³ /h
Compressão e <i>upgrading</i>	Sistema de <i>upgrading</i> de biogás para biometano com vazão de 40 m ³ /h. Sistema de recompressão de biometano 250 bar
Geração de biometano	148.000 m ³ /ano - 405 m ³ /dia
Vida útil	10 anos
Conversão de frota	1 caminhão e 1 veículo leve
Tipo de aproveitamento	Autoconsumo (30%) substituindo diesel e excedente (70%) com preço de GNV transportando via caminhão feixe
Valor da tarifa	2,06 BRL/ m ³
Categoria da tarifa	Preço médio de diesel (BRL 4,3 - MG ANP), preço do GNV, descontado o preço de transporte (BRL 2,10 - MG)

O cenário com biometano apresenta indicadores positivos, com uma TIR que alcança um valor de 33% e um VPL superior aos cenários de aproveitamento de energia elétrica. O valor de *payback* mostra que esse cenário possui menor risco, quando comparado aos cenários de energia elétrica, com 4 anos para retorno do investimento, consideradas as premissas.

Tabela XI
Principais indicadores econômicos para o cenário com geração de biometano da bovinocultura – 1.000 vacas.

Indicador	Cenário C
LCOB (BRL/m ³)	0,72
TIR	33%
VPL (BRL)	795.543,00
Payback (anos)	4
EBITDA (BRL)	2.968.723,00
DMVU* (BRL)	4.826.791,00
CAPEX (BRL)	642.180,0
OPEX/ano (BRL)	60.794,00

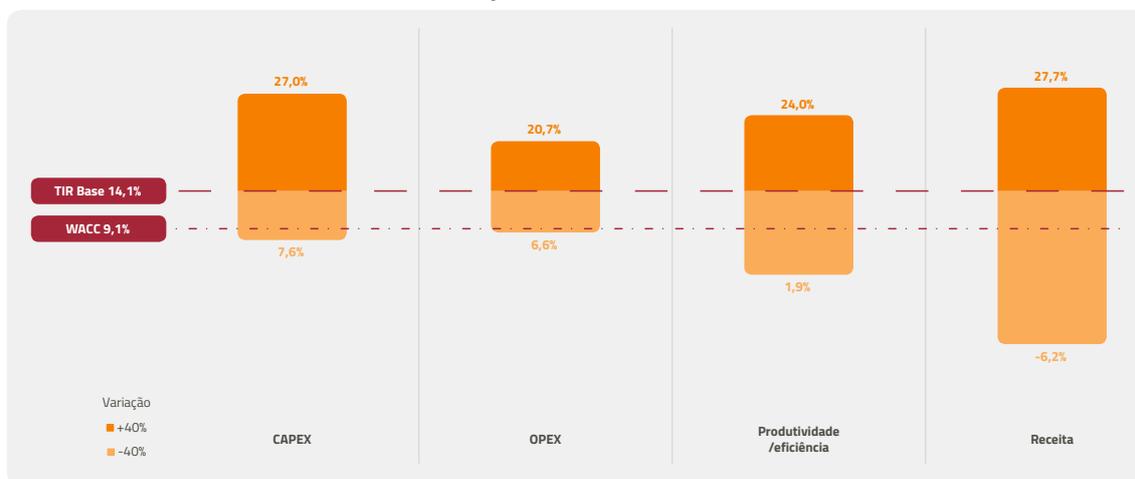
* Dinheiro movimentado ao longo da vida útil do projeto (soma das receitas, CAPEX e OPEX).

III. PROPOSTAS DE SENSIBILIDADE PARA TIR, LCOE E LCOB

Os resultados-base dos cenários da bovinocultura de leite com 1.000 vacas em lactação foram analisados para verificar quão sensíveis são as variações na TIR, LCOE e LCOB, considerando as variações percentuais de $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica e $\pm 50\%$ no cenário com geração de biometano, para os parâmetros CAPEX, OPEX, receita e produtividade/eficiência.

i. CENÁRIO A – geração distribuída com autoconsumo remoto

Neste cenário, o impacto na variação da receita é mais significativo do que os impactos em CAPEX, OPEX e produtividade e eficiência. Com uma alteração para menos 40% na receita, a TIR ficaria negativa, e um aumento na receita elevaria a TIR a 27,7%, bem acima do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, conforme a **Figura XIII**.

Figura XIII
Análise de sensibilidade da TIR do cenário A para bovinocultura – 1.000 vacas.


O maior impacto do LCOE, de acordo com a **Figura XIV**, é atribuído ao OPEX. Assim, uma diminuição de 40% no OPEX poderia reduzir o LCOE até 258 BRL/MWh, potencializando a rentabilidade e a TIR do cenário.

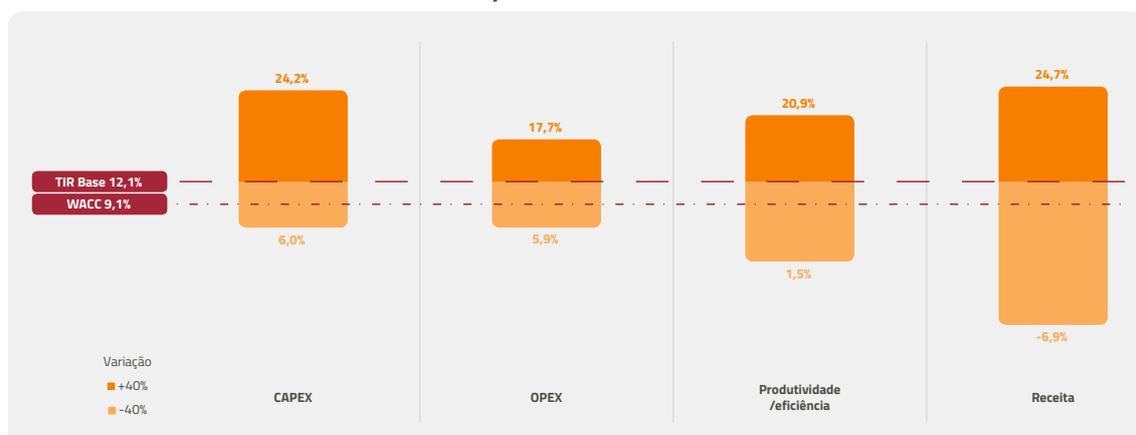
Figura XIV
Análise de sensibilidade do LCOE do cenário A para bovinocultura – 1.000 vacas.



ii. CENÁRIO B – autoconsumo local

Na TIR do cenário B, o maior impacto da variação é na receita, entretanto, a variação no CAPEX apresenta impacto semelhante, de acordo com a **Figura XV**. Com uma redução de 40% na receita, a TIR ficaria negativa, indicando que, nessas condições, não há lucratividade, mas caso haja um acréscimo de 40%, a TIR se eleva, chegando a 24,7%. Com uma redução de 40% no CAPEX do cenário, a TIR passa a ser de 24,4%.

Figura XV
Análise de sensibilidade da TIR do cenário B para bovinocultura – 1.000 vacas.



Conforme apresenta a **Figura XVI**, o LCOE do cenário B é mais impactado quando ocorre uma diminuição do CAPEX, sendo possível alcançar um valor de 235 BRL/MWh.

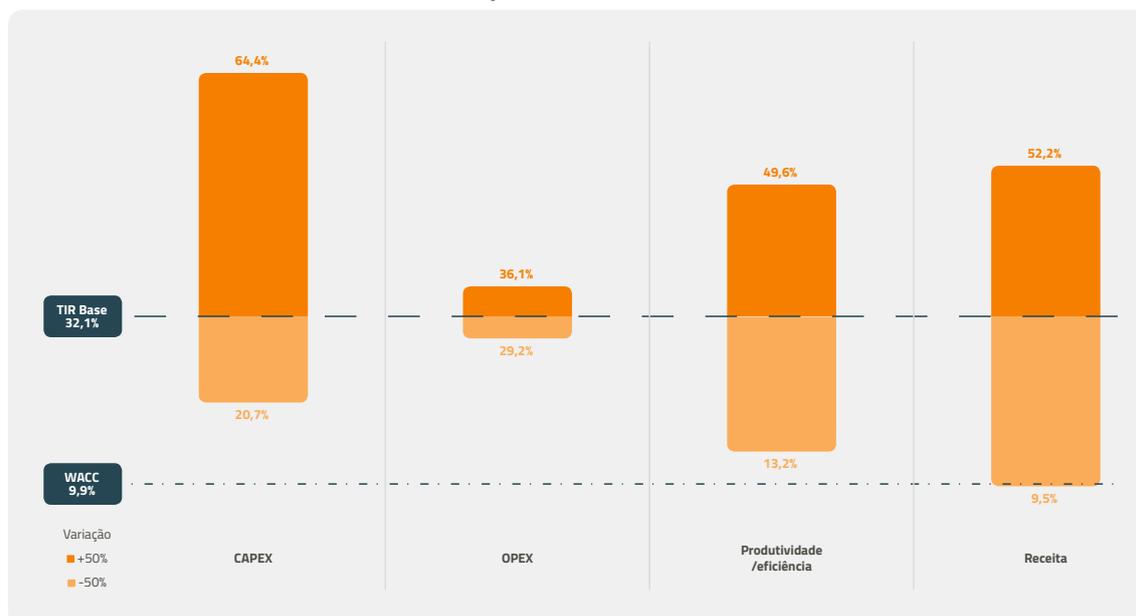
Figura XVI
Análise de sensibilidade do LCOE do cenário B para bovinocultura – 1.000 vacas.



iii. CENÁRIO C – biometano

Neste cenário com geração de biometano, de acordo com a **Figura XVII**, considerando-se a variação em todos os parâmetros para $\pm 50\%$, a TIR permanece viável, acima do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de petróleo, gás e biocombustíveis, no valor de 9,89%, exceto para a receita. O maior impacto é na variação do CAPEX, isto é, uma diminuição de 50% elevaria a TIR a 64,4%.

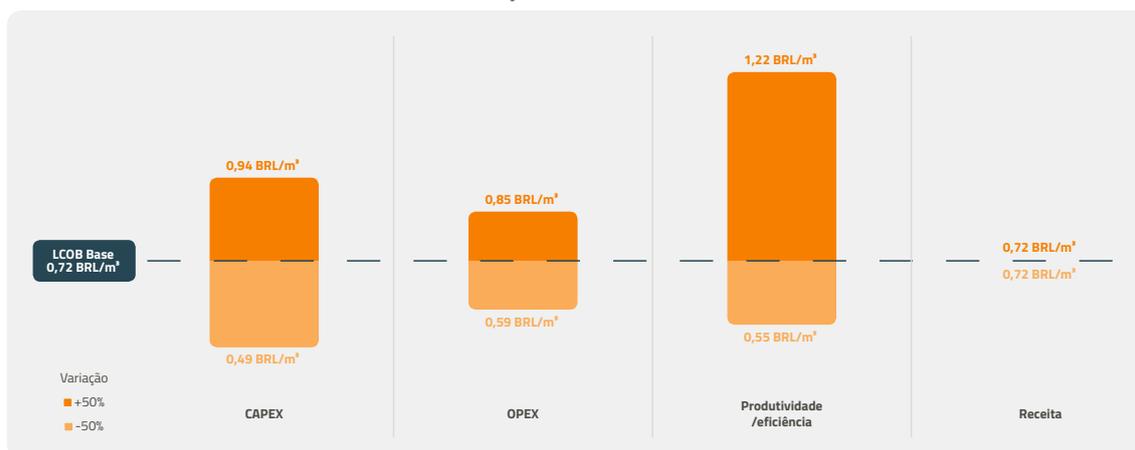
Figura XVII
Análise de sensibilidade da TIR do cenário C para bovinocultura – 1.000 vacas.



Para o LCOB, o parâmetro CAPEX é o fator de maior influência para reduzir seu valor na análise de sensibilidade, isto é, quando o CAPEX diminui 50%, o LCOB chega a 0,49BRL/m³ de biometano, de acordo com a **Figura XVIII**.

Figura XVIII

Análise de sensibilidade do LCOB do cenário C para bovinocultura – 1.000 vacas.



APÊNDICE VI

CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS EM USINA SUCROENERGÉTICA – PROCESSAMENTO DE 2.000.000 T DE CANA-DE-ACÚCAR

Neste caso da indústria sucroenergética, o sistema de biodigestão requer o uso de biodigestor específico para cada tipo de resíduo, sendo os resíduos considerados, nas simulações, a vinhaça e a torta de filtro. A torta de filtro tem um percentual de sólido acima de 15%, é armazenada em silos trincheiras e depois encaminhada para um biodigestor do tipo CSTR (*Continuous-flow Stirred Tank Reactor*), com agitação vertical e horizontal do tipo mecânica.

A vinhaça, que possui de 4% a 6% de sólidos, é estocada em lagoas de retenção e depois inserida em biodigestores horizontais do tipo lagoa coberta (BLC), com um tempo de retenção hidráulica em torno de 30 dias. Para a vinhaça não é necessário aquecimento, pois esta já sai aquecida do processo industrial. O biogás produzido nos biodigestores CSTR e BLC passa, então, por equipamentos para reduzir o H_2S a níveis aceitáveis nos motogeradores.

Na **Tabela XII**, são apresentadas as premissas técnicas utilizadas para o levantamento do potencial de produção de biogás dos cenários. As conversões foram obtidas através de consultas técnicas e testes de laboratório, conforme normativa alemã VDI 4630 de 2016 e comparativo com literatura.

Tabela XII

Premissas técnicas para produção de biogás na indústria sucroenergética com processamento de 2.000.000 t/ano.

Premissa	Valor	Unidade
Quantidade total de cana processada	2.000.000	t/ano
Quantidade de etanol produzido por cana processada	40	L/t
Quantidade de torta de filtro por cana processada	30	kg/t
Concentração de sólidos totais na torta de filtro	30	%
Concentração de sólidos voláteis na torta de filtro	75	%
Conversão de metano por sólidos voláteis em torta de filtro	0,26	Nm ³ CH ₄ /kgSV
Quantidade de vinhaça gerada por etanol produzido	11,5	L/L
Quantidade DQO na vinhaça	31,5	kgDQO/m ³
Conversão de metano por DQO presente na vinhaça	0,24	Nm ³ CH ₄ /kgDQO
Quantidade da vinhaça utilizada nos cenários A, C	980.000	m ³
Quantidade da vinhaça utilizada nos cenários B, D	717.965	m ³
Quantidade de dias em operação de safra	214	dias

I. Cenários da rota tecnológica de geração de energia elétrica

Foi considerada uma operação de 24 h/dia dos motogeradores, com fatores de capacidade de 83%, em cenário com uso total de vinhaça, e de 95%, em cenário com uso parcial da vinhaça, para que seja adequada à realidade de operação. O arranjo empregado nos cenários, para igualar a vazão de biogás oriundo da vinhaça e da torta de filtro, permite adquirir e operar equipamentos que são dimensionados para a operação em tempo integral. Dessa forma, o fator de capacidade aumenta, com melhor aproveitamento da capacidade instalada.

Os cenários analisados foram:

- **Cenário A** – Indústria sucroenergética de pequeno porte, com produção de biogás a partir da vinhaça total disponível e torta de filtro, com geração de energia elétrica com tecnologia de motogerador, para a injeção de energia na rede da distribuidora e obtenção de receita através dos créditos de energia, gerados no modelo de geração distribuída com autoconsumo remoto. Para o processo de geração distribuída, foram consideradas as seguintes premissas: toda a energia gerada é injetada na rede de distribuição; o tomador da energia é do grupo tarifário B3; foi considerada taxa de desconto de energia em 10% para o tomador; tanto o gerador quanto o consumidor da energia estão dentro da área de concessão da região Sudeste.
- **Cenário B** – Indústria sucroenergética de pequeno porte, com produção de biogás a partir de vinhaça (72% da disponibilidade)¹⁹ e torta de filtro com geração de energia elétrica com tecnologia de motogerador, para a injeção de energia na rede da distribuidora e geração de receita através dos créditos de energia, gerados no modelo de geração distribuída com autoconsumo remoto. Para o processo de geração distribuída, foram consideradas as seguintes premissas: toda a energia gerada é injetada na rede de distribuição; o tomador da energia é do grupo tarifário B3; foi considerada taxa de desconto de energia em 10% para o tomador; tanto o gerador quanto o consumidor da energia estão dentro da área de concessão da região Sudeste.

¹⁹ A produção de biogás de vinhaça é limitada pela capacidade volumétrica de geração de biogás a partir da torta de filtro, aproveitando o máximo dos equipamentos de geração de energia durante o ano. A redução do volume da vinhaça é considerada para que a vazão de biogás seja constante ao longo do ano e, com isso, se possa obter um fator de capacidade mais adequado na planta.

Tabela XIII

Premissas e dados para os cenários com geração de energia elétrica – Indústria sucroenergética de pequeno porte.

Dados	Cenário A	Cenário B
Sistema de biodigestão*	CSTR (18.000 m ³) e BLC (65.000 m ³)	CSTR (18.000 m ³) e BLC (45.000 m ³)
Sistema de pré-tratamento do biogás	Tratamento H ₂ S 66,7 kg H ₂ S/h	Tratamento H ₂ S 42,4 kg H ₂ S/h
Tecnologia de conversão em energia elétrica	Motogerador 5 MW	Motogerador 3,474 MW
Fator de capacidade	83%	95%
Quantidade de resíduo	980.000 t/ano	717.965 t/ano
Produção de biogás	18.360.000 Nm ³ /ano	14.884.589 Nm ³ /ano
Vida útil	20 anos	
Tipo de aproveitamento	Créditos por Geração Distribuída para autoconsumo remoto por tomador em B3	
Valor da tarifa	495,4 BRL/MWh - média das tarifas B3 centro-sul retirando 10% do valor da tarifa	
Categoria da tarifa	B3 com 10% desconto para tomador da energia	

* O sistema de biodigestão proposto difere entre os cenários A e B. No cenário A é presumido o uso total de vinhaça e torta de filtro. Já no cenário B ocorre uma redução de cerca de 28% do total de vinhaça no BLC, comparado ao cenário A. Essa redução é realizada com a premissa de igualar a vazão de produção de biogás total da safra com a vazão de produção de biogás na entressafra.

A **Tabela XIV** apresenta os principais indicadores obtidos para os cenários com geração de energia elétrica, e ambos resultaram em valores de TIR, VPL e *payback* positivos, o que indica a viabilidade econômica, nesta análise inicial.

Tabela XIV

Principais indicadores econômicos para os cenários de geração de energia elétrica - Indústria sucroenergética de pequeno porte.

Indicador	Cenário A	Cenário B
LCOE (BRL/MWh)	351,52	363,75
TIR	19%	18%
VPL (BRL)	48.300.329,00	35.562.776,00
<i>Payback</i> (anos)	6,4	6,6
EBITDA (BRL)	329.190.400,00	258.634.844,00
DMVU* (BRL)	745.639.607,00	598.435.726,00
CAPEX (BRL)	56.208.787,00	47.008.977,00
OPEX/ano** (BRL)	9.006.010,00	7.319.798,00

* Dinheiro Movimentado ao longo da Vida Útil do Projeto (soma das receitas, CAPEX e OPEX).

**OPEX/ano calculado com o valor de OPEX total ao fim do projeto, contando inflação de 3,5% ao ano, dividindo pelo tempo do projeto.

Observa-se que, para todos os cenários com geração de energia elétrica a partir do aproveitamento de biogás, nesse porte da indústria sucroenergética, o valor de TIR é positivo e maior que o valor do custo de capital (representado pelo WACC do setor de energia elétrica – 9,07%). Os maiores valores de TIR, VPL e menores valores de *payback* foram observados no cenário A, com uso total da capacidade da vinhaça.

II. Cenários da rota tecnológica do biometano

O sistema de biodigestão é o mesmo da rota de geração de energia elétrica. Para a produção de biometano, é necessário um sistema para remoção de impurezas, CO₂ e umidade, de modo a garantir 90% de CH₄ no gás, além disso, há a necessidade de compressão do gás em cilindros.

A proposta de receita foi estimada pelo abatimento de custo com combustível diesel, internamente na indústria, e o excedente considerado com preço de GNV, com o devido transporte do mesmo em caminhão feixe, em um raio de 50km. Como a indústria sucroenergética é localizada em áreas rurais, distante dos *grids* de gás natural, não se assumiu a produção de biometano para conseqüente injeção e venda no *grid* de gás natural.

- **Cenário C** – Indústria sucroenergética de pequeno porte, com produção de biogás a partir da vinhaça total disponível e torta de filtro, com *upgrade* para autoconsumo de biometano na frota da indústria sucroenergética e o excedente considerado com preço de GNV, transportado com caminhão feixe. Nesse cenário, foram consideradas as seguintes premissas: parte do biometano gerado é consumido pelo gerador (25%); o gerador faz o autoconsumo como combustível veicular em frota própria, com conversão dos motores para aproveitar o biometano; a propriedade encontra-se na região Sudeste; a compressão do biometano, que é feita na própria indústria, é levada em conta nos custos, descontando o preço de transporte; e o excedente (75%) é considerado com preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe.
- **Cenário D** – Indústria sucroenergética de pequeno porte, com produção de biogás a partir da vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com *upgrade* para autoconsumo do biometano na frota da indústria sucroenergética e o excedente considerado com preço de GNV e transportado via caminhão feixe. Nesse cenário, foram consideradas as seguintes premissas: parte do biometano gerado é consumido pelo gerador (25%); o gerador faz o autoconsumo como combustível veicular em frota própria, com conversão dos motores para aproveitar o biometano; a propriedade encontra-se na região Sudeste; a compressão do biometano, que é feita na própria indústria, é levada em conta nos custos, descontando o preço de transporte; e o excedente (75%) é considerado com preço de GNV mais o valor do transporte em caminhão feixe.

Tabela XV

Premissas e dados para os cenários com geração de biometano – Indústria sucroenergética de pequeno porte.

Dados	Cenário C	Cenário D
Sistema de biodigestão*	CSTR (18.000 m ³) e BLC (65.000 m ³)	CSTR (18.000 m ³) e BLC (45.000 m ³)
Sistema de pré-tratamento do biogás	Tratamento H ₂ S 67 kg H ₂ S/h	Tratamento H ₂ S 48 kg H ₂ S/h
Compressão do biometano	Upgrade de biometano de vazão de 2.462 m ³ /h	Upgrade de biometano de vazão de 1.761 m ³ /h
Geração resíduo	980.000 t/ano	717.965 t/ano
Geração de biometano	10.844.767 m ³ /ano	8.791.934 m ³ /ano
Fator de capacidade	83%	95%
Vida útil	20 anos	
Conversão da frota	33 caminhões	
Tipo de aproveitamento	Autoconsumo (25%) substituindo diesel e excedente (75%) com preço de GNV transportando via caminhão feixe	
Valor da tarifa	2,46 BRL/ m ³	
Categoria da tarifa	Preço médio de diesel (BRL 4,0 - ANP), preço do GNV, descontado o preço de transporte (BRL 2,25)	

*O sistema de biodigestão difere entre os cenários C e D. No cenário C é presumido o uso total de vinhaça e torta de filtro, e no cenário D ocorre uma redução de cerca de 28% do total de vinhaça em BLC, comparado ao cenário C. Essa redução é realizada com a premissa de igualar a vazão de produção de biogás total da safra com a vazão de produção de biogás em entressafra.

A **Tabela XVI** apresenta os principais resultados obtidos para os cenários com biometano, e ambos mostraram resultados positivos, indicando a viabilidade econômica, nessa análise inicial.

Tabela XVI

Principais indicadores econômicos para os cenários de geração de biometano - Indústria sucroenergética de pequeno porte.

Indicador	Cenário C	Cenário D
LCOB (BRL/m ³)	1,06	1,10
TIR	35%	33%
VPL (BRL)	123.602.261,00	97.347.433,00
Payback (anos)	4	4,1
EBITDA (BRL)	637.905.696,00	513.407.917,00
DMVU* (BRL)	982.605.144,00	801.766.076,00
CAPEX (BRL)	52.678.327,00	44.742.018,00
OPEX/ano** (BRL)	7.300.528,00	6.105.943,00

* Dinheiro Movimentado ao longo da Vida Útil do Projeto (soma das receitas, CAPEX e OPEX).

Os resultados de TIR para os cenários de biometano mostraram viabilidade, alcançando valores de 35 e 33% para os cenários C e D, respectivamente. O VPL também apresentou valores positivos para esses cenários, sendo superior aos cenários de aproveitamento da energia elétrica. Consideradas todas as premissas, os baixos valores de *payback* indicam que os cenários com biometano apresentam menor risco, quando comparados aos cenários de energia elétrica.

III. PROPOSTAS DE SENSIBILIDADE PARA TIR, LCOE E LCOB

Os resultados-base dos cenários da indústria sucroenergética foram analisados para verificar quão sensíveis são as variações na TIR, LCOE e LCOB, considerando-se as variações percentuais de $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica e $\pm 50\%$ no cenário com geração de biometano, para os parâmetros CAPEX, OPEX, receita e produtividade/eficiência.

i. CENÁRIO A – uso da vinhaça total e torta de filtro, com geração de energia elétrica e aproveitamento dos créditos de energia gerados no modelo de geração distribuída.

Neste cenário, o impacto da variação no CAPEX é mais significativo do que os impactos nos demais parâmetros, conforme a **Figura XIX**. Com uma alteração negativa de 40% no CAPEX, a TIR fica acima do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, e mesmo com incremento no CAPEX em 40%, a TIR continua viável, ou seja, com lucratividade.

Figura XIX

Análise de sensibilidade da TIR do cenário A para indústria sucroenergética de pequeno porte.



Sobre o LCOE para este cenário apresentado na **Figura XX**, o parâmetro com maior influência é o OPEX, que pode chegar a 271 BRL/MWh, melhorando sua rentabilidade.

Figura XX

Análise de sensibilidade do LCOE do cenário A para indústria sucroenergética de pequeno porte.



ii. CENÁRIO B – Uso da vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com geração de energia elétrica e aproveitamento dos créditos de energia gerados no modelo de geração distribuída.

O resultado da análise de sensibilidade, aqui, é idêntico ao que ocorre no cenário A. O maior impacto da variação, na análise, também é no CAPEX, que, com uma diminuição de 40% eleva a TIR para 28%, aumentando a lucratividade nessas condições, de acordo com a **Figura XX**.

Figura XXI

Análise de sensibilidade da TIR do cenário B para indústria sucroenergética de pequeno porte.



O maior impacto do LCOE, de acordo com a **Figura XXII**, é atribuído ao OPEX. Assim, uma diminuição de 40% no OPEX poderia reduzir o LCOE para 282 BRL/MWh.

Figura XXII

Análise de sensibilidade do LCOE do cenário B para indústria sucroenergética de pequeno porte.

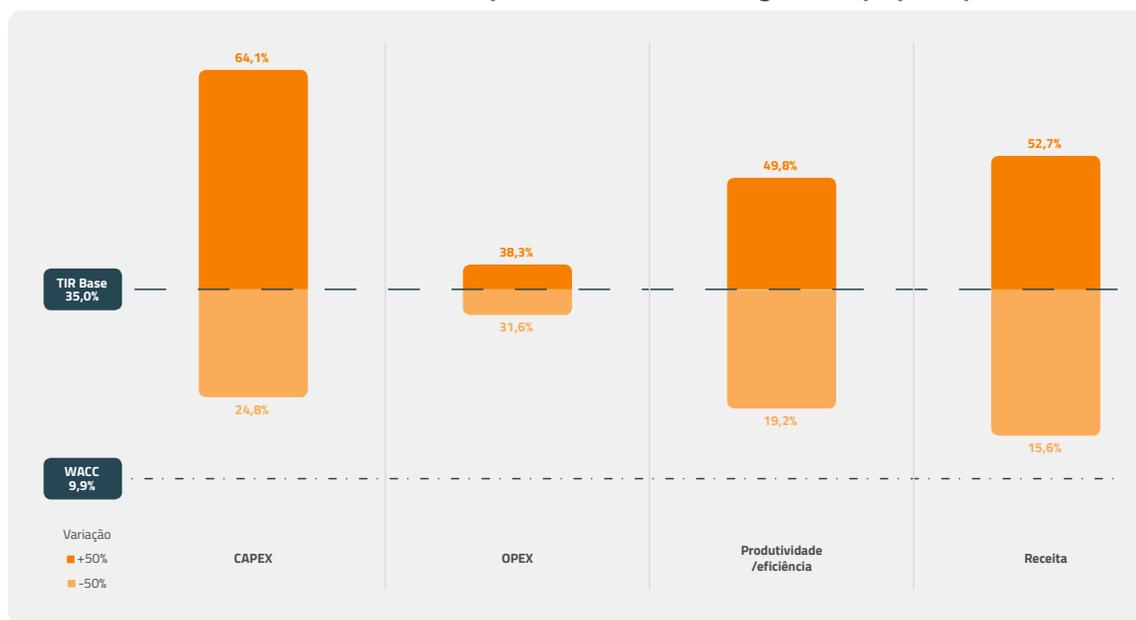


iii. CENÁRIO C – uso da vinhaça total e torta de filtro, com upgrade para biometano.

Neste cenário, de acordo com a **Figura XXIII**, o maior impacto é no CAPEX, isto é, uma diminuição de 50% elevaria a TIR a 64,1%. Contudo, todos os parâmetros, após variação para ±50%, continuam viáveis, apresentando TIR positiva acima do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de petróleo, gás e biocombustíveis, no valor de 9,89%.

Figura XXIII

Análise de sensibilidade da TIR do cenário C para indústria sucroenergética de pequeno porte.



O LCOB indica o custo do biometano, e, portanto, quanto menor o valor, maior a competitividade desse biometano. O parâmetro OPEX apresenta-se como fator de maior influência para a diminuição do valor de LCOB na análise de sensibilidade, chegando a 0,78BRL/m³ de biometano, como pode ser observado na **Figura XXIV**.

Figura XXIV

Análise de sensibilidade do LCOB do cenário C para indústria sucroenergética de pequeno porte.

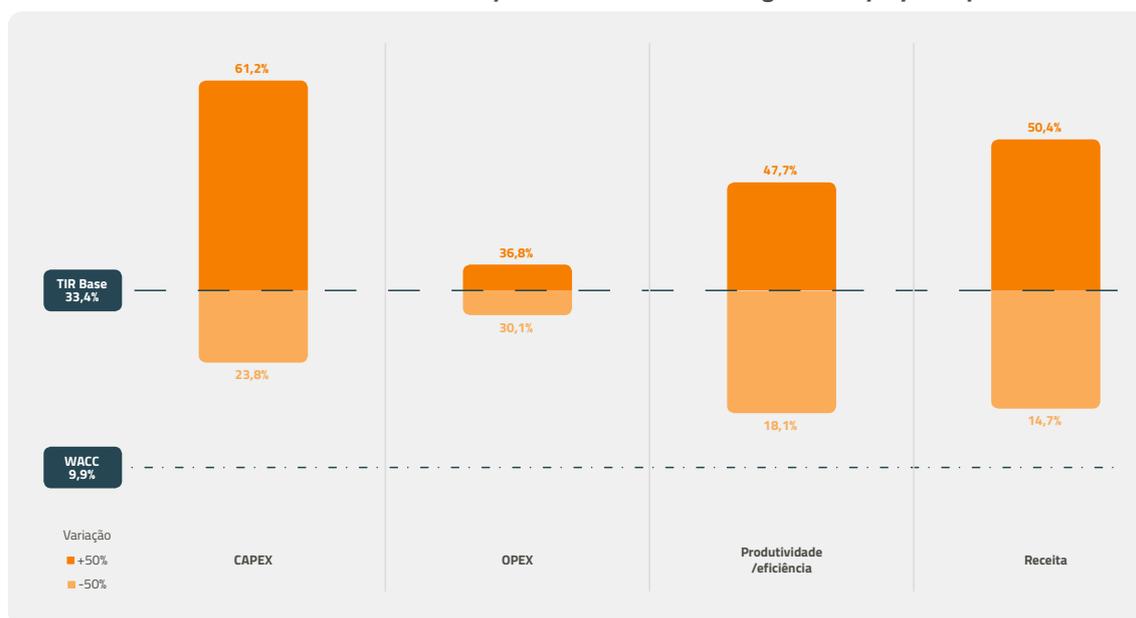


iv. CENÁRIO D – produção de biogás a partir de vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com *upgrade* para biometano.

No cenário demonstrado na **Figura XXV**, assim como ocorre no cenário C, considerando-se a variação na TIR, todos os parâmetros com variação para $\pm 50\%$ continuam viáveis, apresentando TIR positiva acima do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de petróleo, gás e biocombustíveis, no valor de 9,89%. O maior impacto é no CAPEX, que, com uma redução de 50%, elevaria a TIR a 61,2%.

Figura XXV

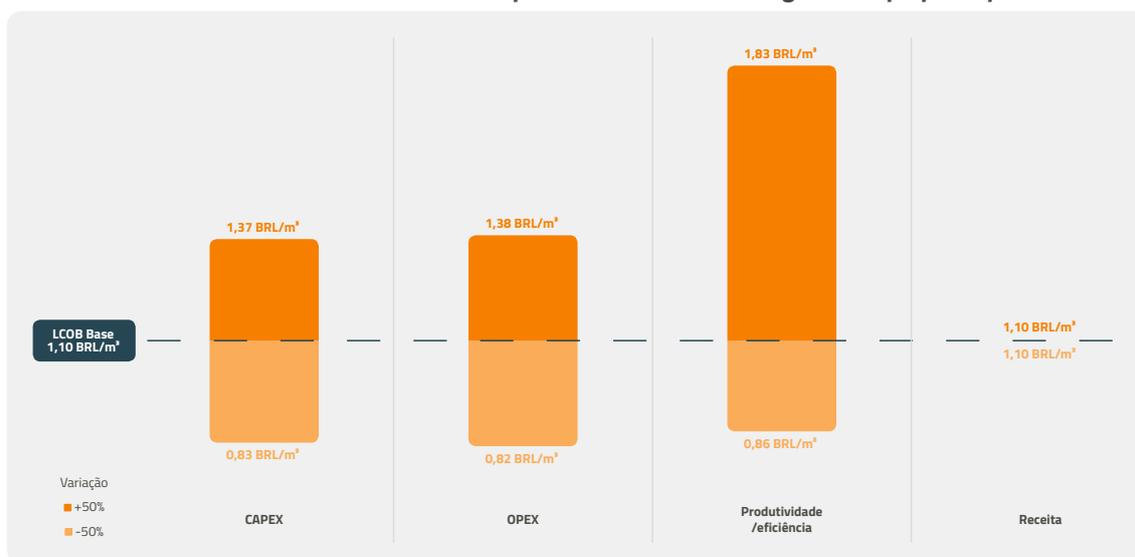
Análise de sensibilidade da TIR do cenário D para indústria sucroenergética de pequeno porte.



Para o LCOB, a redução no OPEX é o parâmetro de maior influência para a diminuição do valor de LCOB na análise de sensibilidade, chegando a 0,82 BRL/m³ de biometano, conforme pode ser observado na **Figura XXVI**.

Figura XXVI

Análise de sensibilidade do LCOB do cenário D para Indústria sucroenergética de pequeno porte.



APÊNDICE VII

CONTEXTUALIZAÇÃO E RESULTADOS DO CASO-BASE DE BIOGÁS EM USINA SUCROENERGÉTICA – PROCESSAMENTO DE 3.500.000 T DE CANA-DE-ACÚCAR

Neste caso da indústria sucroenergética, o sistema de biodigestão requer o uso de biodigestor específico para cada tipo de resíduo, sendo os resíduos considerados, nas simulações, a vinhaça e a torta de filtro. A torta de filtro tem um percentual de sólido acima de 15%, é armazenada em silos trincheiras e depois encaminhada para um biodigestor do tipo CSTR (*Continuous-flow Stirred Tank Reactor*), com agitação vertical e horizontal do tipo mecânica.

A vinhaça, que possui de 4% a 6% de sólidos, é estocada em lagoas de retenção e depois inserida em biodigestores horizontais do tipo lagoa coberta (BLC), com um tempo de retenção hidráulica em torno de 30 dias. Para a vinhaça não é necessário aquecimento, pois esta já sai aquecida do processo industrial. O biogás gerado nos biodigestores CSTR e BLC deverão passar por equipamentos para reduzir o H₂S a níveis aceitáveis nos motogeradores.

Na **Tabela XVII**, são apresentadas as premissas técnicas utilizadas para o levantamento do potencial de produção de biogás dos cenários analisados. As conversões foram obtidas através de consultas técnicas e testes de laboratório, conforme normativa alemã VDI 4630 de 2016 e comparativo com literatura.

Tabela XVII

Premissas técnicas para produção de biogás na indústria sucroenergética com processamento de 3.500.000 t/ano.

Premissa	Valor	Unidade
Quantidade total de cana processada	3.500.000	t/ano
Quantidade de etanol produzido por cana processada	40	L/t
Quantidade de torta de filtro por cana processada	30	kg/t
Concentração de sólidos totais na torta de filtro	30	%
Concentração de sólidos voláteis na torta de filtro	75	%
Conversão de metano por sólidos voláteis em torta de filtro	0,26	Nm ³ CH ₄ /kgSV
Quantidade de vinhaça gerada por etanol produzido	11,5	L/L
Quantidade DQO na vinhaça	31,5	kgDQO/m ³
Conversão de metano por DQO presente na vinhaça	0,24	Nm ³ CH ₄ /kgDQO
Quantidade da vinhaça utilizada nos cenários A, C	1.610.000	m ³
Quantidade da vinhaça utilizada nos cenários B, D	1.151.439	m ³
Quantidade de dias em operação de safra	214	dias

I. Cenários da rota tecnológica de geração de energia elétrica

Neste caso, foi considerada uma operação de 24 h/dia para os motogeradores, com fatores de capacidade de 83%, em cenário com uso total de vinhaça, e de 95%, em cenário com uso parcial da vinhaça, para que seja adequada à realidade da operação. O arranjo empregado para igualar a vazão de biogás proveniente da vinhaça e torta de filtro permite adquirir e operar equipamentos que são dimensionados para operação em tempo integral. Assim seu fator de capacidade aumenta, com melhor aproveitamento da capacidade instalada.

Os cenários analisados foram:

- **Cenário A** – Indústria sucroenergética de médio/grande porte com produção de biogás a partir da vinhaça e torta de filtro, com geração de energia elétrica com tecnologia de motogerador, para venda da energia no modelo de mercado livre de energia. Para o cenário de venda de energia em mercado livre, foram consideradas as seguintes premissas: toda a energia gerada é vendida para um consumidor em contrato; o gerador da energia pertence ao grupo tarifário de livre mercado; a TUSD assumida foi de 70 BRL/MWh, acrescentada ao preço de venda; e tanto o gerador quanto o consumidor da energia estão dentro da área de concessão da região Sudeste.
- **Cenário B** – Indústria sucroenergética de médio/grande porte com produção de biogás a partir de vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com geração de energia elétrica com tecnologia de motogerador, para venda de energia no modelo de mercado livre de energia. Para o cenário de venda de energia em mercado livre, foram consideradas as seguintes premissas: toda a energia gerada é vendida para um consumidor em contrato; o gerador da energia pertence ao grupo tarifário de livre mercado; a TUSD assumida foi de 70 BRL/MWh, acrescentada ao preço de venda; e tanto o gerador quanto o consumidor da energia estão dentro da área de concessão da região Sudeste.

Tabela XVIII

Premissas e dados para os cenários com geração de energia elétrica - Indústria sucroenergética de médio/grande porte.

Dados	Cenário A	Cenário B
Sistema de biodigestão*	CSTR (31.000 m ³) e BLC (112.000 m ³)	CSTR (31.000 m ³) e BLC (80.000 m ³)
Sistema de pré-tratamento do biogás	Tratamento H ₂ S 116,7 kg H ₂ S/h	Tratamento H ₂ S 83,5 kg H ₂ S/h
Tecnologia de conversão em energia elétrica	Motogerador 8,532 MW	Motogerador 6,1 MW
Fator de capacidade	83%	95%
Quantidade de resíduo	9801.715.000 t/ano	1.256.000 t/ano
Produção de biogás	32.130.000 Nm ³ /ano	26.048.000 Nm ³ /ano
Vida útil	20 anos	
Tipo de aproveitamento	Venda da energia no mercado livre	
Valor da tarifa	317 BRL/MWh (média de tarifas de mercado livre do Sudeste, com adição da TUSD 70 BRL/MWh)	
Categoria da tarifa	Mercado livre sudeste, com adição de TUSD	

*O sistema de biodigestor proposto difere entre os cenários A e B. No cenário A é presumido o uso total de vinhaça e torta de filtro. Já no cenário B ocorre uma redução de cerca de 28% do total de vinhaça no BLC, comparado ao cenário A. Essa redução é realizada com a premissa de igualar a vazão de produção de biogás total da safra com a vazão de produção de biogás em entressafra.

A **Tabela XIX** apresenta os principais resultados obtidos para os cenários de geração de energia elétrica. Observa-se que os cenários resultaram em valores de TIR, VPL e *payback* positivos, indicando viabilidade nessa análise inicial.

Tabela XIX

Principais indicadores econômicos para os cenários com geração de energia elétrica – Indústria sucroenergética de médio/grande porte.

Indicador	Cenário A	Cenário B
LCOE (BRL/MWh)	330,49	332,49
TIR	9%	9%
VPL (BRL)	3.199.548,00	1.714.341,00
<i>Payback</i> (anos)	10,2	10,3
EBITDA (BRL)	262.570.989,00	214.629.699,00
DMVU* (BRL)	945.980.485,00	775.460.751,00
CAPEX (BRL)	96.315.797,00	79.922.951,00
OPEX/ano** (BRL)	14.677.342,00	12.022.703,00

* Dinheiro Movimentado ao longo da Vida Útil do Projeto (soma das receitas, CAPEX e OPEX).

**OPEX/ano calculado com o valor de OPEX total ao fim do projeto, contando inflação de 3,5% ao ano, dividindo pelo tempo do projeto.

O valor de TIR, apesar de positivo, situa-se um pouco abaixo do valor do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%.

II. Cenários da rota tecnológica do biometano

O sistema de biodigestão é o mesmo da rota de geração de energia elétrica. Para produção de biometano, há um sistema para remoção de impurezas, CO₂ e umidade, garantindo 90% de CH₄ no gás. Para utilização de biometano, há a necessidade de compressão do gás em cilindros.

A proposta de receita foi estimada pelo abatimento do custo com combustível diesel na indústria e o excedente considerado com preço de GNV, com o devido transporte do mesmo em caminhão feixe, em um raio de 50 km. Como a indústria sucroenergética é localizada nas áreas rurais, distante dos *grids* de gás natural, não se assumiu a produção de biometano para conseqüente injeção e venda no *grid* de gás natural.

- Cenário C** – Indústria sucroenergética de médio/grande porte com produção de biogás a partir de vinhaça e torta de filtro, com *upgrade* para autoconsumo de biometano (15%) em substituição ao diesel e o excedente (85%) considerado com preço de GNV mais o transportado via caminhão feixe. Nesse cenário, foram consideradas as seguintes premissas: parte do biometano gerado é autoconsumido; o gerador faz o autoconsumo como combustível veicular em frota própria, com conversão dos motores para aproveitar o biometano; a propriedade encontra-se na região Sudeste; a compressão do biometano, que é feita na própria indústria, é levada em conta nos custos, descontando o preço de transporte; e o excedente é considerado com preço de GNV, com transporte através de caminhão feixe.
- Cenário D** - Indústria sucroenergética de médio/grande porte com produção de biogás a partir de vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com *upgrade* para autoconsumo do biometano (15%) na frota em substituição ao diesel e o excedente (85%) considerado com preço de GNV e transportado via caminhão feixe. Para esse cenário foram consideradas as seguintes premissas: parte do biometano é consumido pelo gerador; o gerador faz o autoconsumo como combustível veicular em frota própria, com conversão dos motores para aproveitar o biometano; a propriedade encontra-se na região Sudeste; a compressão do biometano, que é feita na própria indústria, é levada em conta nos custos, descontando o preço de transporte; e o excedente é considerado com preço de GNV mais o transporte através de caminhão feixe.

Tabela XX

Premissas e dados para os cenários com geração de biometano - Indústria sucroenergética de médio/grande porte.

Dados	Cenário C	Cenário D
Sistema de biodigestão*	CSTR (31.000 m ³) e BLC (112.000 m ³)	CSTR (31.000 m ³) e BLC (80.000 m ³)
Sistema de pré-tratamento do biogás	Tratamento H ₂ S 117,7 kg H ₂ S/h	Tratamento H ₂ S 84,2 kg H ₂ S/h
Purificação e compressão do biometano	Sistema <i>upgrade</i> de biometano com capacidade de 2.462 m ³ /h	Sistema <i>upgrade</i> de biometano com capacidade de 3.082 m ³ /h
Quantidade de resíduo	1.715.000 t/ano	1.256.000 t/ano
Geração de biometano	18.978.342 m ³ /ano	15.385.884 m ³ /ano
Fator de capacidade	83%	95%
Vida útil	20 anos	
Conversão da frota	58 caminhões	
Tipo de aproveitamento	Autoconsumo (15%) substituindo diesel e excedente (85%) com preço de GNV transportando via caminhão feixe	
Valor da tarifa	2,38 BRL/ m ³	
Categoria da tarifa	Preço médio de diesel (BRL 4,0 - ANP), preço do GNV, descontado o preço de transporte (BRL 2,25)	

*O sistema de biodigestão difere entre os cenários C e D. No cenário C é presumido o uso total de vinhaça e torta de filtro, e no cenário D ocorre uma redução de cerca de 28% do total de vinhaça em BLC, comparado ao cenário C. Essa redução é realizada com a premissa de igualar a vazão de produção de biogás total da safra com a vazão de produção de biogás em entressafra, sugerindo um fator de capacidade mais adequado e com aumento na utilização do capital.

A **Tabela XXI** apresenta os principais resultados obtidos para os cenários de geração de biometano.

Tabela XXI

Principais indicadores econômicos para os cenários com geração de biometano – Indústria sucroenergética de médio/grande porte.

Indicador	Cenário C	Cenário D
LCOE (BRL/MWh)	1,01	0,88
TIR	35%	33%
VPL (BRL)	209.237.378,00	163.461.835,00
Payback (anos)	4,0	4,2
EBITDA (BRL)	1.088.049.293,00	872.358.789,00
DMVU* (BRL)	1.654.583.257,00	1.355.086.767,00
CAPEX (BRL)	90.212.697,00	77.193.715,00
OPEX/ano** (BRL)	11.908.032,00	10.138.357,00

Os resultados de TIR para os cenários de biometano indicam lucratividade, alcançando valores de 35 e 33% para os cenários C e D, respectivamente. O VPL também apresentou valores positivos para os cenários de biometano, sendo estes superiores aos dos cenários com venda de energia elétrica como fonte de receita. Os baixos valores de *payback* mostram que os cenários com biometano apresentam menor risco financeiro, quando comparados aos dos cenários de venda de energia elétrica, consideradas todas as premissas.

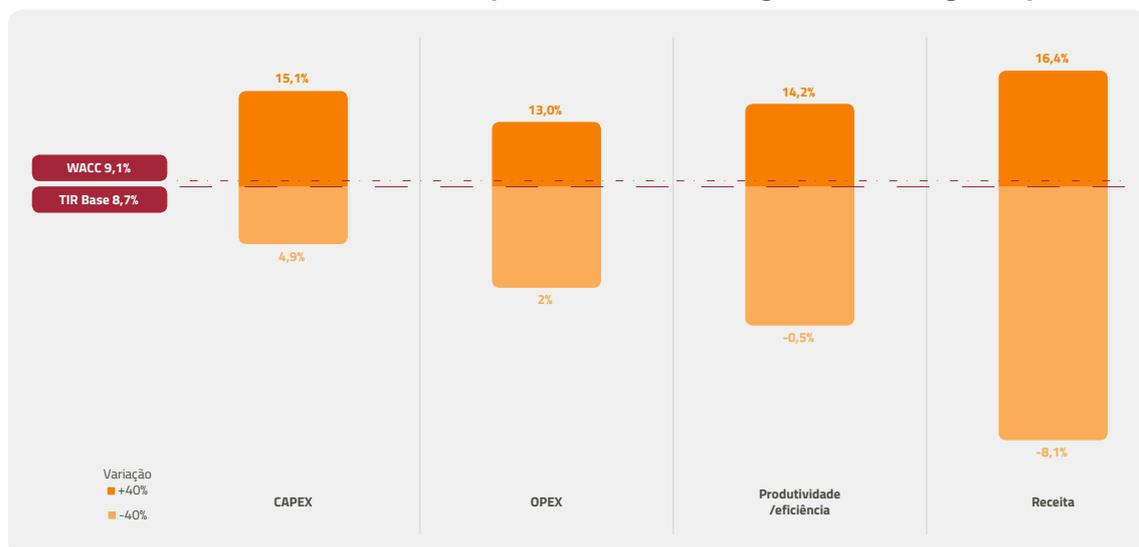
III. PROPOSTAS DE SENSIBILIDADE PARA TIR, LCOE E LCOB

Os resultados-base dos cenários do setor sucroenergético foram analisados para verificar quão sensíveis são as variações na TIR, LCOE e LCOB, considerando-se as variações percentuais de $\pm 40\%$ nos cenários com geração de energia elétrica e $\pm 50\%$ no cenário com geração de biometano, para os parâmetros CAPEX, OPEX, receita e produtividade/eficiência.

i. CENÁRIO A – uso da vinhaça total e torta de filtro, com geração de energia elétrica e venda em modelo de mercado livre de energia.

Neste cenário, os resultados-base da TIR partem de um valor abaixo do custo de capital, representado pelo custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%. O maior impacto é na receita, ou seja, no preço da tarifa, sendo mais significativo que os impactos nos demais parâmetros, de acordo com a **Figura XXVII**. Com uma alteração para mais de 40% na receita, a TIR ficaria acima do custo de capital e, portanto, em cenário com lucratividade, mas se a receita diminuir em 40%, a TIR torna-se negativa.

Figura XXVII
Análise de sensibilidade da TIR do cenário A para indústria sucroenergética de médio/grande porte.



De acordo com a **Figura XXVIII**, o OPEX é o parâmetro com maior impacto no LCOE, e uma redução de 40% pode baixar o LCOE a 267 BRL/MW.

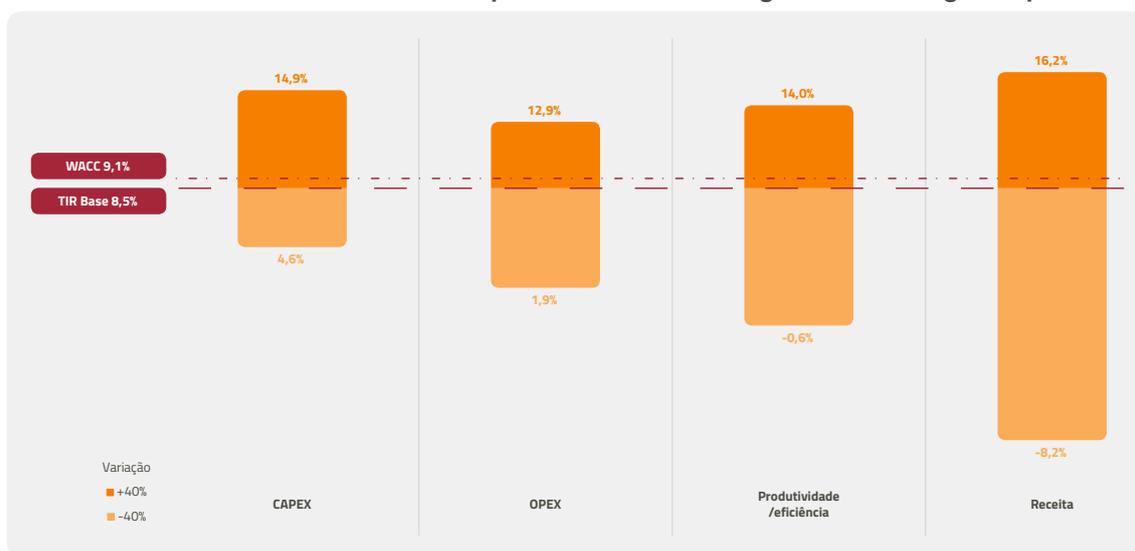
Figura XXVIII
Análise de sensibilidade do LCOE do cenário A para indústria sucroenergética de pequeno porte.



ii. CENÁRIO B – uso da vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com geração de energia e venda em modelo de mercado livre de energia.

O cenário B, apresentado na **Figura XXIX**, segue a tendência dos resultados do cenário anterior. O maior impacto da variação, na análise, é na receita, pois, com um aumento de 40%, a TIR fica acima do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de energia elétrica, no valor de 9,07%, o que torna o cenário lucrativo.

Figura XXIX
Análise de sensibilidade da TIR do cenário B para indústria sucroenergética de médio/grande porte.



O maior impacto no LCOE é atribuído ao OPEX. Assim, uma diminuição de 40% no OPEX poderia reduzir o LCOE até 269 BRL/MWh, conforme **Figura XXX**. Isto significa que o LCOE base de 345 BRL/MWh pode chegar a 269 BRL/MWh, se houver uma redução no valor do OPEX.

Figura XXX
Análise de sensibilidade do LCOE do cenário B para indústria sucroenergética de médio/grande porte.

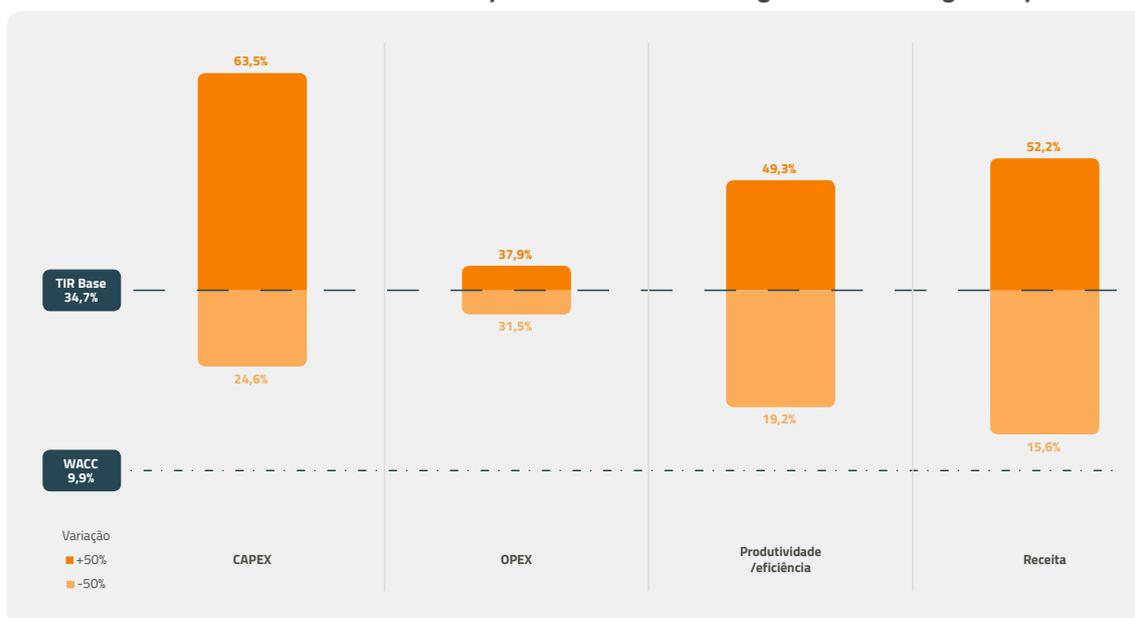


iii. CENÁRIO C - uso da vinhaça total e torta de filtro, com *upgrade* para biometano.

Conforme a **Figura XXXI**, neste cenário, o maior impacto é no CAPEX, mas, com uma variação para $\pm 50\%$, todos os parâmetros continuam viáveis, apresentando TIR positiva, acima do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de petróleo, gás e biocombustíveis, no valor de 9,89%.

Figura XXXI

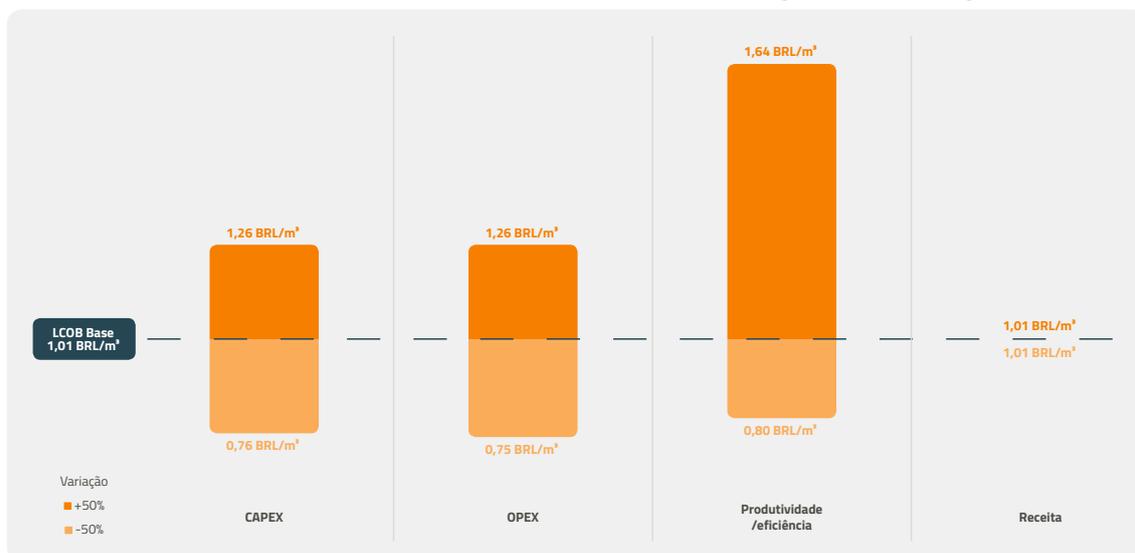
Análise de sensibilidade da TIR do cenário C para indústria sucroenergética de médio/grande porte.



O valor de LCOB pode chegar a 0,75BRL/m³ de biometano com redução do parâmetro OPEX, fator de maior influência para a diminuição do valor de LCOB na análise de sensibilidade, como observado na **Figura XXXII**.

Figura XXXII

Análise de sensibilidade do LCOB do cenário C para indústria sucroenergética de médio/grande porte.

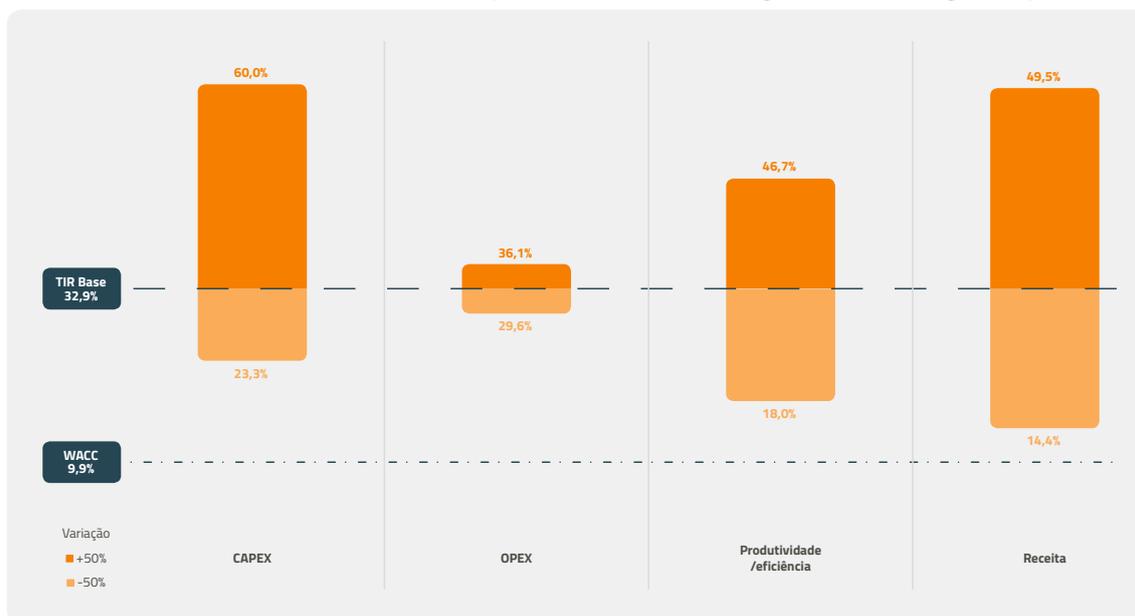


iv. CENÁRIO D - uso da vinhaça (72% da disponibilidade) e torta de filtro, com upgrade para biometano.

Neste cenário, assim como ocorre no cenário C, todos os parâmetros, após variação para ±50%, continuam com TIR viáveis, apresentando TIR positiva, acima do custo médio ponderado do capital (WACC) do setor de petróleo, gás e biocombustíveis, no valor de 9,89%, como demonstra na **Figura XXXIII**. O maior impacto é no CAPEX, que, com redução de 50%, elevaria a TIR a 60%.

Figura XXXIII

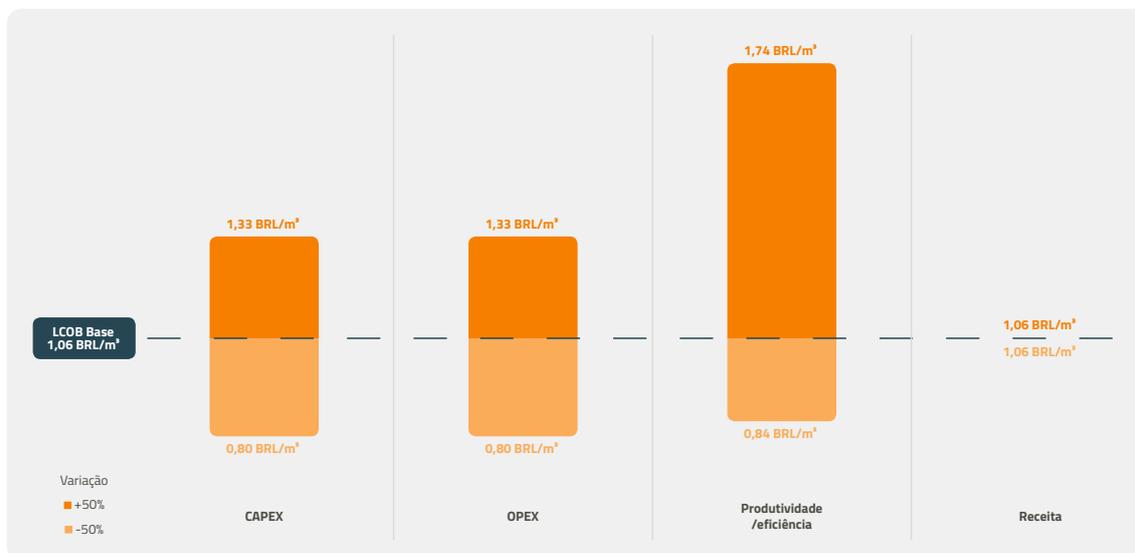
Análise de sensibilidade da TIR do cenário D para indústria sucroenergética de médio/grande porte.



Conforme a **Figura XXXIV**, neste cenário, o OPEX e o CAPEX são os parâmetros de maior influência para redução do valor de LCOB na análise de sensibilidade, chegando a 0,80 BRL/m³ de biometano.

Figura XXXIV

Análise de sensibilidade do LCOB do cenário D para indústria sucroenergética de médio/grande porte.



APÊNDICE VIII

TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA, DIESEL E GÁS NATURAL

As estimativas de custos de tarifas de energia elétrica foram obtidas através dos Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição, realizado pela ANEEL para o ano de 2020 (média entre os meses de janeiro a setembro). A **Tabela XXII** mostra os valores de tarifa média de fornecimento sem impostos para as principais concessionárias dos estados de Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Ceará, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Paraíba. Para comparação foram utilizados os grupos tarifários B2, A4, B3 e Mercado Livre. A **Tabela XXIII** apresenta os valores médios das tarifas de Mercado Livre praticados nas regiões do país.

Tabela XXII

Valores de tarifa média de fornecimento sem impostos para as principais concessionárias de energia elétrica.

UF	Concessionária	Tarifa média de fornecimento sem impostos (BRL/MWh)		
		A4	B2	B3
MG	CEMIG DISTRIBUIÇÃO S.A	472,69	477,60	628,65
	DME DISTRIBUIÇÃO S.A. - DMED	405,63	387,55	507,56
	ENERGISA MINAS GERAIS - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A.	533,66	478,64	603,53
SP	AMAZONAS ENERGIA S.A	554,62	507,02	663,65
	COMPANHIA JAGUARI DE ENERGIA	419,93	419,75	542,72
	COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ	443,26	399,10	528,97
	COMPANHIA PIRATINGA DE FORÇA E LUZ	423,33	374,80	488,19
	EDP SÃO PAULO DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA S.A.	426,76	401,80	526,52
	ELEKTRO REDES S.A.	490,80	406,51	544,47
	ELETROPAULO METROPOLITANA ELETRICIDADE DE SÃO PAULO S.A.	449,41	406,40	520,33
	ENERGISA SUL-SUDESTE - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A.	445,64	387,21	501,05
	BA	COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA	442,55	382,99
CE	COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ	446,33	416,24	532,45
PB	EPB - ENERGISA PARAÍBA - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A	454,77	374,96	546,45
	EBO - ENERGISA BORBOREMA - DISTRIBUIDORA DE ENERGIA S.A	403,14	386,47	501,37
RN	COSERN - COMPANHIA ENERGÉTICA DO RIO GRANDE DO NORTE COSERN	427,45	349,36	506,18
PE	CELPE - COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO	422,59	408,60	557,56

Fonte: Elaborada com dados da ANEEL (2021).

Tabela XXIII

Preço médio da tarifa de energia no mercado livre por região*.

Região	Preço médio sem impostos (BRL/MWh)
Sul	247,53
Sudeste e Centro-Oeste	247,92
Norte	247,54
Nordeste	179,05

*Tarifa média para mercado livre praticada nos últimos 6 meses de 2020.

O preço médio das tarifas de diesel e diesel S10 praticado por estado (média dos postos de combustível) é apresentado na **Tabela XXIV**.

Tabela XXIV

Tarifa média de diesel e diesel S10 por estado.

Estado	Tarifa média (BRL/L)	
	Diesel	Diesel S10
DF	4,31	4,38
GO	4,403	4,45
MT	4,412	4,52
MS	4,208	4,27
AL	4,632	4,53
BA	4,193	4,26
CE	4,419	4,41
MA	4,153	4,15
PB	4,15	4,28
PE	4,031	4,18
PI	4,383	4,47
RN	4,521	4,68
SE	4,339	4,54
AC	5,553	5,22
AP	4,657	4,72
AM	4,307	4,41
PA	4,439	4,34
RO	4,448	4,50
RR	4,539	4,59
TO	4,281	4,36
ES	4,001	4,11
MG	4,231	4,30
RJ	4,263	4,30
SP	4,148	4,25
PR	3,998	4,01
RS	4,093	4,17
SC	4,107	4,17

Fonte: Preço médio do Diesel praticado nos postos (ANP, 2021), através do Sistema de Levantamento de Preços (SLP), média de preços dos períodos 04/04/21 até 10/04/21.

A **Tabela XXV** apresenta os resultados da busca de preços de gás natural para diferentes usos.

Tabela XXV

Tarifa média de gás natural por tipo e por distribuidora.

Estado	Distribuidora de Gás Natural	Tarifa média (BRL/m ³)			
		Industrial	Automotivo	Comercial	Residencial
AL	ALGÁS	1,90	5,50	3,80	2,20
BA	BAHIAGÁS	1,50	4,10	2,80	1,40
ES	ES GÁS	1,60	2,30	2,40	1,80
RJ	CEG	1,90	6,40	5,30	1,60
RJ	CEG RIO	1,70	4,70	3,10	1,50
CE	CEGÁS	2,10	6,00	2,90	2,60
SP	COMGÁS	2,00	6,30	5,30	1,80
PE	COPERGÁS	1,60	4,70	2,70	1,50
PB	PBGÁS	1,80	7,90	3,70	2,20
RN	POTIGÁS	2,00	3,10	2,90	2,20
SE	SERGÁS	1,90	3,90	2,80	1,70
MG	GASMIG	1,90	6,70	4,40	2,10
SP	SÃO PAULO SUL	1,80	4,00	3,40	1,60
SP	GÁS BRASILIANO	2,00	5,40	4,20	1,90
PR	COMPAGÁS	2,20	4,30	3,70	2,10
MS	MSGÁS	2,20	4,60	3,80	2,10
SC	SCGÁS	1,70	3,80	3,60	2,10
RS	SULGÁS	2,10	5,20	4,10	1,90
AM	CIGÁS	2,20	3,80	2,60	2,30

Fonte: Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural do mês de outubro de 2020 (MME, 2021).



APÊNDICE IX

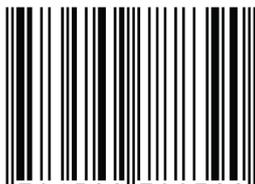
COMPILAÇÃO DE PREMISSAS UTILIZADAS NA MODELAGEM ECONÔMICA DOS CASOS

Modelo de Negócio	Escala	Modalidade de aproveitamento da eletricidade/ Biometano	Grupo tarifário	Quantidade de resíduo tratado (m³/ano)	Geração de biogás ou biometano (m³/ano)	O&M variável produção de biogás ou biometano (BRL/m³)	O&M variável tratamento de resíduos (BRL/t)	Vida Útil (anos)	Potência instalada (kW)	Horas de operação (h/ano)	Fator de capacidade (%)	Geração de energia (MWh/ano)	Preço da energia (BRL/MWh)	Custo demanda contratada (BRL/kWh)	O&M variável geração de energia (BRL/kWh)	Custo de conversão de frota para uso de biometano (BRL)
Geração de energia elétrica a partir do biogás de dejetos da pecuária	Propriedades com 10.000 suínos em terminação	GD	B3	16.790	584.000	0,1	0,1	10	200	6.205	80	992,8	552,9	16,62	0,08	-
	Propriedades com 500 vacas em lactação	Autoconsumo	B2	16.790	584.000	0,1	0,1	10	200	6.205	80	992,8	477,6	0	0,08	-
		GD	B3	23.010	154.588	0,1	0,1	10	32	7.665	80	196,24	552,9	16,62	0,08	-
	Propriedades com 1.000 vacas em lactação	Autoconsumo	B2	23.010	154.588	0,1	0,1	10	32	7.665	80	196,24	477,6	0	0,08	-
		GD	B3	46.020	309.176	0,1	0,1	10	75	8.030	80	309,17	552,9	16,62	0,08	-
	Autoconsumo	B2	46.020	309.176	0,1	0,1	10	75	8.030	80	309,17	477,6	0	0,08	-	
Geração de biometano a partir do biogás de dejetos da pecuária	Propriedade com 10.000 suínos em terminação	30% autoconsumo em frota; 70% como GNV com transporte por caminhão feixe	30% Diesel (BRL 4,3) e 80% GNV (BRL 2,1) + transporte	16.790	280.320	0,2	0,1	10	-	-	-	-	-	-	-	71.000 (2 caminhões 2 carros)
	Propriedades com 1.000 vacas em lactação			46.020	148.000	0,25	0,1	10	-	-	-	-	-	-	-	35.500 (1 caminhão 1 carro)
Geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos da indústria sucroenergética	Processamento de 2.000.000 t/ano de cana de açúcar	GD	B3	980.000	18.360.000	0,021	-	20	5000	8.760	83	36.354,00	495,4	8,12	0,09	-
	Processamento de 3.500.000 t/ano de cana de açúcar	GD	B3	717.965	14.884.589	0,022	-	20	3474	8.760	95	28.910,60	495,4	18,12	0,09	-
		Autoconsumo	ML	1.715.000	32.130.000	0,021	-	20	8532	8.760	83	62.034,50	317	18,12	0,09	-
	Processamento de 2.000.000 t/ano de cana de açúcar	Autoconsumo	ML	1.256.000	26.048.000	0,022	-	20	6100	8.760	95	50.764,20	317	18,12	0,09	-
		25% autoconsumo em frota; 75% como GNV com transporte por caminhão feixe	25% Diesel (BRL 4,00) e 75% GNV (BRL 2,50) + transporte	980.000	10.844.767	0,329	-	20	-	8.760	83	-	-	-	-	-
	Processamento de 3.500.000 t/ano de cana de açúcar	15% autoconsumo em frota; 85% como GNV com transporte por caminhão feixe	15% Diesel (BRL 4,00) e 85% GNV (BRL 2,50) + transporte	717.965	8.791.934	0,323	-	20	-	8.760	95	-	-	-	-	-
			1.715.000	18.978.000	0,327	-	20	-	8.760	83	-	-	-	-	-	BRL 2.610.000 (58 caminhões)
			1.256.000	15.385.000	0,335	-	20	-	8.760	95	-	-	-	-	-	BRL 2.610.000 (58 caminhões)



ISBN: 978-65-997883-9-0

CBL



9 786599 788390