

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

MATEUS GIACOBO MOREIRA

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO**

**Santa Maria, RS
2019**

MATEUS GIACOBINO MOREIRA

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO**

Projeto de pesquisa do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro de Produção**.

Orientador: Dr. Eng. Cristiano Roos

Santa Maria, RS
2019

VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO

ECONOMIC VIABILITY OF ELECTRIC POWER GENERATION FROM BIOGAS IN SANITARY LANDFILL

Mateus Giacobbo Moreira¹, Cristiano Roos²

RESUMO

Os estudos da utilização de biogás como fonte de geração de energia elétrica estão em pauta na busca por fontes alternativas de energia. O aproveitamento da energia provinda do biogás permite a sobrevida dessa mistura de gases potencialmente poluentes, de forma a utilizar essa fonte de energia frequentemente ignorada e manejada de forma incorreta. Aliado a isso, a comercialização de um subproduto pode proporcionar um incremento econômico no fluxo de caixa da empresa. Assim, a pergunta que define o problema de pesquisa desse trabalho é: é economicamente viável captar e converter o biogás gerado em aterro sanitário em energia elétrica? O estudo tem como objetivo principal analisar a viabilidade econômica de um sistema de captação e conversão de biogás em energia elétrica, tendo como cenário um aterro sanitário no estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizados procedimentos metodológicos de modelagem e simulação para a geração de 11 cenários de captação de biogás e de geração de energia elétrica. O resultado obtido é de que os 11 cenários simulados são viáveis economicamente, obtendo VPL positivos, TIR maiores do que a TMA estabelecida no estudo, com um *Payback* Descontado de 8,21 anos no cenário mais otimista, e um LCOE de R\$0,58/KWh.

Palavras-chave: Engenharia econômica; viabilidade econômica; fontes alternativas de energia; biogás.

ABSTRACT

The studies related to the usage of biogas as a source of electric power are on the agenda for researches on alternative sources of energy. The biogas energy recovery provides a larger utilization of this potentially pollutant gas mixture, in a way to use this source of energy often ignored and wrongly managed. Allied to that, a subproduct commercialization may provide an economical increase on the company's cash flow. Therefore, the research problem's definition question is: is it economically viable to capture and to convert landfill generated biogas into electric power? The study's major objective is to analyze a biogas capture and conversion to electricity system's economic viability, having as scenario a sanitary landfill on the state of Rio Grande do Sul. Methodological procedures of modeling and simulation were used for the generation of 11 scenarios of biogas capture and generation of electric power. The obtained result is that the 11 simulated scenarios are economically viable, reaching positives NPV, IRR higher than the work's stipulated MARR, with a Discounted Payback of 8,21 years on the optimistic scenario, and an R\$0,58/KWh LCOE.

Keywords: Economic engineering; economic viability; alternative energy sources; biogas.

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia de Produção, autor; Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Centro de Tecnologia – UFSM.

² Engenheiro de Produção, orientador; Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina; Professor do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas – UFSM.

1 INTRODUÇÃO

A utilização irresponsável das fontes energéticas globais, aliada ao consumo desenfreado de bens e serviços demonstra consequências ambientais, econômicas e sociais negativas. Em 2016 81,6% da produção energética mundial foi obtida a partir de combustíveis fósseis, de um total de 13.729 Mtep produzidos. Desses, 4.950 Mtep foram destinados à produção de energia elétrica, resultando em 24.790 TWh ofertados e 2.850 Mtep em perdas térmicas (BRASIL, 2017).

Ainda, dos 287 Mtep da matriz energética brasileira no ano de 2016, 55,1% foram provenientes de combustíveis fósseis, que resultaram em uma matriz elétrica de 579 TWh. Apenas para fins de comparação, no ano de 1973 a matriz energética nacional foi de 82,2 Mtep e a matriz elétrica nacional de 64,7 TWh (BRASIL, 2017).

Conforme Barros, Tiago Filho e da Silva (2012), o aumento na capacidade energética de um país está relacionado ao seu PIB. Segundo Meressi e Silva (2016), o crescente padrão de consumo da população brasileira, apesar de contribuir para a melhoria do bem-estar, deverá aumentar a exigência do meio ambiente para fornecer energia e matérias-primas, bem como sua função como receptáculo de resíduos.

Barros, Tiago Filho e da Silva (2012) ressaltam que no Brasil, aumentos na renda e no consumo de bens e serviços levaram ao aumento na geração de resíduos sólidos, que são enviados a aterros como método de tratamento e disposição final. O processo de degradação dos resíduos sólidos libera gás metano, que se não for captado por sistemas de coleta e aproveitamento, ou queima em *flare*, será liberado para a atmosfera. Além disso, o metano é altamente inflamável, o que acrescenta risco de incêndio e explosões (FIGUEIREDO, 2011).

Existem duas formas para o aproveitamento do biogás, sua queima ou sua conversão em eletricidade. O biogás permite a produção de energia elétrica e/ou térmica (PECORA, 2006). Assim, devido às possibilidades que podem se apresentar, as instalações de aproveitamento de biogás em aterro devem ter suas particularidades analisadas individualmente, levando em conta informações como localização, necessidades energéticas locais, investimento financeiro disponível e legislação vigente previamente à execução do projeto (ENSINAS, 2003).

1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA E DO PROBLEMA DE PESQUISA

O tema do presente trabalho é o estudo da viabilidade econômica da utilização do biogás gerado em aterro sanitário para conversão em energia elétrica. Mais precisamente, o problema

de pesquisa é baseado na questão: É economicamente viável captar e converter o biogás gerado em aterro sanitário em energia elétrica?

Será utilizada como base para esse estudo uma empresa cujo projeto de captação e conversão do biogás está em instalação em uma cidade do estado do Rio Grande do Sul, o que irá vincular o presente trabalho com a prática empresarial e mercadológica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a Organização das Nações Unidas (1972), a capacidade da Terra em produzir recursos renováveis vitais deve ser mantida e, quando praticável, restaurada e melhorada. Assim, a justificativa principal desse trabalho se dá pelo intuito de contribuir na busca por amenizar o uso de combustíveis fósseis como fonte de energia. Além disso, se justifica por buscar alternativas para dar sobrevida ao crescente volume de resíduos sólidos gerados cotidianamente, e ainda, apresentar uma utilização mais útil da fonte de energia renovável estudada.

Pode-se compreender a importância do estudo desse tema ao ponto que Ensinas (2003) salienta que a concepção de aterros sanitários que visam o aproveitamento do biogás gerado, além do armazenamento correto do lixo, possibilita uma maior eficiência na produção e captação do metano provindo de resíduos. Para a concepção de tais projetos, é necessária a averiguação da viabilidade econômica e a comprovação de seu retorno financeiro.

1.3 OBJETIVOS

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é analisar a viabilidade econômica de um sistema de captação de biogás para sua conversão em energia elétrica. Para essa finalidade, foram designados alguns objetivos específicos, sendo eles: 1. Coletar dados técnicos e financeiros em um aterro sanitário onde se tenha um sistema de captação de biogás para conversão em energia elétrica. 2. Analisar os dados coletados aplicando métodos de análise de investimentos 3. Determinar se existe viabilidade econômica do projeto no aterro sanitário estudado e se o mesmo modelo se aplica a outros aterros semelhantes.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta subdivisão em cinco seções. A próxima seção traz o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento do estudo. Na sequência, a terceira seção apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para atingir o objetivo do trabalho. A quarta seção apresenta os resultados obtidos, bem como as análises do autor. A conclusão do trabalho é apresentada na quinta e última seção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico irá tratar de definições sobre energia renovável, biogás e energia provinda do biogás, bem como estudos aplicados nesta área. Nos estudos aplicados, além de questões técnicas, serão abordados também estudos de Engenharia Econômica que se relacionam a área. Após, serão apresentadas definições em Engenharia Econômica, envolvendo também o Valor Líquido Presente, a Taxa Interna de Retorno, o *Payback* Descontado, o *Levelized Cost of Energy* e a Taxa Mínima de Atratividade.

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS

Pode ser caracterizada como energia renovável a aquela que provém de uma fonte naturalmente reabastecida, sendo, portanto, inesgotável. Segundo Espa e Durán (2018), há ampla aceitação de que a substituição da energia convencional por energias renováveis pode desenvolver um importante papel na atenuação das mudanças climáticas. Justamente uma das formas de reduzir a dependência de combustíveis fósseis é o uso de sistemas de energia renovável, que geralmente são benéficos ao ambiente (KALOGIROU, 2015).

A energia renovável é de suma importância para a economia nacional. O Balaço Energético Nacional de 2018 aponta que 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil provém de fontes renováveis de energia, isso ao se analisar a produção interna e a importação de energia, bem como, tomando 2017 como ano base (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018).

Entre especialistas em energia é consenso que, para o sucesso do desenvolvimento do setor de energia renovável em um país, fontes de energias renováveis nacionais, políticas favoráveis, recursos humanos adequadamente treinados, mecanismos institucionais e tecnologias apropriadas são requisitos (SINGH, 2012). Gatzert e Kosub (2016) apontam que

riscos políticos e de regulamentação representam a maior barreira aos investimentos em energia renovável, ao mesmo tempo em que as coberturas de seguro e mitigação de riscos são fortemente limitadas. Por outro lado, a produção e o consumo de energia renovável permitem o desenvolvimento de novas tecnologias (CAN; KORKMAZ, 2019).

Morgan et al. (2017) colocam que a produção de biogás vem sendo o foco de muitos países em desenvolvimento, com pesquisas que focam no melhoramento dos processos de produção e na qualidade do resultado. Conforme Heinicke (2015), o biogás é composto de gases provindos da fermentação anaeróbica da matéria orgânica chamada de biomassa. Sua composição é em torno de 66% de metano, e 33% de dióxido de carbono e demais gases, tornando-o interessante em uma perspectiva energética.

A produção de biogás pode ser considerada uma das inovações mais influentes na agricultura alemã nas últimas décadas (APPEL; OSTERMEYER-WIETHAUP; BALMAN, 2016). O metano e outros gases produzidos em aterro sanitário fornecem uma fonte de energia, essa majoritariamente mais limpa que as demais fontes de energia convencionais (OMAR; MNCWANGO, 2005).

Segundo ARCADIS (2010), para o ano de 2020 há uma previsão de geração de 1.322.321.457 Nm³ de biogás a partir de resíduos sólidos de 86 municípios brasileiros com população superior a 200 mil habitantes, havendo possibilidade de utilização para fins energéticos. Ainda, dos 1.614.391 m³/dia de biogás produzidos para a geração de energia em 2015 no Brasil, 705.190 m³/dia provieram de aterros sanitários, aproximadamente 43% da geração total (CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS-BIOGÁS, 2017).

Ketola e Salmi (2010) colocam a geração de biogás como uma forma inteligente de eliminação de perdas. Além disso, possibilita que os mecanismos alimentados por biogás melhorem o manejo de resíduos enquanto maximizam o uso de uma fonte econômica de energia. De acordo com Guo, Dong e Wang (2013), geralmente o biogás é usado em plantas que produzem energia calorífica e elétrica. Essas plantas consistem em máquinas e motores movidos à combustão, alimentadas com biogás, que acionam um gerador para produzir eletricidade.

A eficiência energética do biogás varia entre 8% e 54% quando utilizado somente na geração de eletricidade, entre 16% e 83% quando utilizado exclusivamente como energia calorífica e entre 18% a 90% quando ambas combinadas (HAKAWATI et al., 2017). Assim, conforme Achinas S., Achinas V. e Euverink (2017) há expectativa que investimentos em

digestão anaeróbica tenham sucesso, devido ao baixo custo da matéria prima disponível e à utilização diversa do biogás.

2.2 APLICAÇÕES ENVOLVENDO ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS

A geração de energia elétrica com base na utilização de biogás vem sendo tomada como tema para estudos em nível mundial. Desenvolvidos ou em desenvolvimento, diversos países das mais variadas formas econômicas, sociais e culturais apresentam pesquisas sobre este meio de geração energética. Assim, nessa subseção foi realizada uma pesquisa de publicações contendo temas similares ao do presente trabalho, com a finalidade de comprovar a relevância deste estudo frente ao cenário científico internacional.

Kalyani e Pandey (2014) apontam a Polônia, Malásia, Itália, Canadá, Gana e outros como países que utilizam sistemas de geração de energia elétrica a partir de aterros sanitários, resíduos sólidos e biomassa agrícola como fonte de geração e segurança energética, bem como forma de tratamento de resíduos. Segundo os autores, são 29 plantas de geração registradas com potência média de: 1 MW na Polônia, 134,6 MWh no Canadá e na Malásia, no ano de 2010, foram gerados $2,20 \times 10^9$ kWh a partir dessa fonte. Além disso, os autores pontuam um potencial futuro para a mesma utilização na Índia, país com uma das maiores populações do mundo e grande gerador de resíduos.

Em um estudo de Scarlat, Dallemand e Fahl (2018), foi constatado um aumento significativo na capacidade de geração elétrica a partir do biogás, a maior no setor de bioenergia na União Europeia. Segundo os autores, a utilização do biogás como forma de energia calorífica, concomitante à alimentação de meios de transporte, comprova o interesse de países desenvolvidos nessa fonte flexível de energia. Os autores ainda reforçam a União Europeia como a maior produtora de biogás, além de citarem diversos países fora desse continente que estão começando a implementar, ou já utilizam, tais tecnologias.

Mustafa, Calay e Román (2015) realizaram um estudo de caso em uma planta de tratamento de resíduos de uma população de 230 mil habitantes na Noruega, onde são tratados resíduos orgânicos residenciais, lodos de águas residuais e uma pequena parte de resíduos rurais, utilizando de digestão anaeróbica com tecnologia de processos de hidrólise térmica. A capacidade total da planta era de 30.000 a 45.000 toneladas de resíduos orgânicos. Neste estudo observa-se a importância da composição dos materiais e resíduos utilizados como fonte de biogás, percebendo que variações nessa composição desempenham consequências diretas no rendimento do processo de obtenção de energia elétrica, principalmente relacionados à

quantidade de amônia e ácidos graxos de cadeia longa provinda de resíduos animais das zonas rurais.

Norouzi, Di Maria e El-Hoz (2018) compararam três métodos de obtenção de energia elétrica a partir do biogás na Alemanha, sendo eles o método combinado de calor e energia (CHP), o método de melhoramento de biogás e o método de célula de combustível de óxido sólido. O estudo levou em conta questões econômicas, ambientais e de eficiência.

Em uma abordagem na realidade brasileira, Udaeta et al. (2019), analisam em seu trabalho uma planta de tratamento de esgoto no estado de São Paulo. Comparando o consumo e o potencial energético da planta estudada, avaliou como positivo o reaproveitamento energético do biogás gerado, sendo apresentados potenciais financeiros, ambientais e estratégicos para a matriz energética do estado. Avaci et al. (2013) desenvolveram um estudo com base em uma propriedade produtora de suínos, no estado do Paraná. A propriedade possuía 4.673 suínos alojados, que proporcionavam, a partir de seus dejetos, uma geração de 554 m³ de biogás ao dia. Ainda, estava em operação um motor-gerador com 66,22 kW de potência média e consumo específico de 45,55 m³ de biogás ao dia, gerando energia durante 10 horas diárias.

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2018, a capacidade instalada de geração elétrica no Brasil a partir do biogás, em 2017, era de 135 MW. Embora ainda seja uma fração pequena na matriz energética nacional, vem demonstrando crescimento, quando que em 2008 era de apenas 35 MW (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). O Plano Nacional de Energia 2030 coloca como objetivo um potencial de geração de eletricidade com resíduos urbanos, a partir do biogás de aterros, de 1.700 MW em 2020, e de 2.600 MW em 2030 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2007).

2.3 ENGENHARIA ECONÔMICA

A Engenharia Econômica é essencial para a avaliação de investimentos e de finanças em geral. A decisão de investimento depende muito dos métodos de Engenharia Econômica, e só assim é possível avaliar e distinguir as oportunidades (MOTTA et al., 2009). A Engenharia Econômica envolve formular, estimar e avaliar os resultados econômicos, quando há alternativas para realizar certo propósito. É um conjunto de técnicas matemáticas que simplifica a comparação econômica (BLANCK; TARQUIN, 2008). Assim, nesta seção serão abordados alguns métodos de Engenharia Econômica, além da Taxa Mínima de Atratividade.

2.3.1 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

De acordo com Blanck e Tarquin (2008), a Taxa Mínima de Atratividade é um dos valores mais importantes em um estudo de avaliação de alternativas de investimento. Conforme Casarotto Filho e Kopittke (2010), a TMA é estimada como a taxa de juros equivalente à rentabilidade das demais opções disponíveis de aplicações correntes e de baixo risco. Hirschfeld (1989) aponta que os resultados dos investimentos em análise devem ser melhores que as demais opções de aplicações financeiras de onde se estabelece a TMA. Assim, a taxa utilizada como base comparativa é chamada Taxa Mínima de Atratividade.

Para pessoas físicas pode-se considerar a caderneta de poupança e aplicações de renda fixa como referência para a definição da TMA. Já para empresas pode-se considerar a taxa de remuneração de títulos bancários, média ponderada dos rendimentos das contas do capital de giro ou uma meta estratégica, a depender do prazo e da importância estratégica das alternativas (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2010).

2.3.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Segundo Hirschfeld (1989), o Valor Presente Líquido tem como finalidade determinar um valor no instante considerado inicial, a partir de um fluxo de caixa formado por entradas e saídas. Conforme Polo (1996), o VPL é baseado no conceito de capitais, e tem como objetivos principais apurar o resultado financeiro. Melo (2012) aponta que a alternativa com maior Valor Presente Líquido deve ser o investimento escolhido. Ainda, demonstra a Equação 1 como forma de definir o valor do VPL.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (1)$$

Onde: VPL representa o fluxo de caixa do investimento [R\$]; FC_t é o valor do fluxo de caixa no instante t [R\$]; n é o número de períodos no tempo; t é o período genérico no tempo; k é a taxa de desconto, ou TMA; I_0 é o investimento inicial.

2.3.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa de juros que torna nulo o VPL de determinado fluxo de caixa é a Taxa Interna de Retorno. Com essa taxa, a somatória das saídas se iguala à das entradas do fluxo de caixa (HIRSCHFELD, 1989). Melo (2012) coloca que a TIR, após ter seu valor definido, deve ser comparada à TMA no momento em que a decisão sobre o investimento for ser tomada. Newnan, Lavelle e Eschenbach (2014) discorrem que, ao se comparar duas ou mais opções de investimentos, devem ser rejeitadas quaisquer alternativas em que a TIR for menor que a TMA. Siqueira, Souza e Ponciano (2011), apresentam a Equação 2, que permite o cálculo da TIR.

$$0 = \sum_{t=1}^n \left(\frac{FC_t}{(1+k)^t} \right) - I_0 \quad (2)$$

Onde: k é a Taxa Interna de Retorno.

2.3.4 Período de *Payback*

Período de *Payback* é o tempo necessário para que as entradas do investimento se igualem às saídas do investimento (NEWNAN; LAVELLE; ESCHENBACH, 2014). A regra do *Payback* para tomar decisões de investimento deve considerar um prazo de corte específico, assim, todos os projetos de investimento que tiverem período de *Payback* igual ou inferior ao prazo podem ser aceitos, caso contrário, deverão ser rejeitados (ROSS et al., 2015). O período de recuperação nunca deve ser utilizado como a principal ou única forma de análise de alternativas. Ao contrário, deve ser determinado como um dado de auxílio, ou forma de triagem inicial, em conjunto com outros métodos de análise (BLANK; TARQUIN, 2008).

Conforme Ross et al. (2015), na abordagem do *Payback* Descontado primeiro se desconta os fluxos de caixa, e após, pergunta-se quanto tempo leva para que os fluxos de caixa descontados igualem ao investimento inicial. Assim, o *Payback* Descontado tem uma aplicação muito parecida ao *Payback* Simples, porém seus valores são descontados de acordo com a TMA, ao contrário do *Payback* Simples, em que não se leva em consideração o valor do dinheiro no tempo.

2.3.5 *Levelized Cost of Energy (LCOE)*

Segundo Ueckerdt et al. (2013), o LCOE é uma métrica comum para comparação de tecnologias de geração de energia. Ainda conforme os autores, essa métrica permite comparar os custos de geração de energia de fontes convencionais e fontes renováveis, apesar de essas terem uma estrutura de custos diferente. Conforme Bruck, Sandborn e Goudarzi (2018) a definição de LCOE é o custo que, se associado a cada unidade de energia produzida pelo sistema durante o período analisado, irá igualar o custo total da vida de ciclo (TLCC) quando descontado de volta ao ano base.

O LCOE é estimado calculando-se o VPL das saídas ao longo da vida útil da planta produtora de energia, dividido pelo VPL da quantia total de energia gerada ao longo da vida útil da planta. Assim o LCOE é determinado pelo VPL do custo unitário de energia sobre o tempo de vida da planta (ABDELHADY; BORELLO; SHABAN, 2018). Embora o LCOE seja útil para comparação entre diferentes tecnologias, esse método não revela a receita necessária para financiar um projeto usando uma determinada tecnologia (LEVITT et al., 2011). De acordo com Abdelhady, Borello e Shaban (2018), a fórmula mostrada na Equação 3 representa o método mais comum de estimar o LCOE de tecnologias de energia renováveis.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (3)$$

Onde: I_t é o custo de investimento no ano t [R\$]; M_t são as despesas com manutenção e operações no ano t [R\$]; F_t são as despesas com combustível no ano t [R\$]; E_t é a geração de energia no ano t [KWh]; r é a taxa de desconto, podendo ser nominal ou real; n tempo de vida esperado da planta energética [períodos].

2.4 APLICAÇÕES ENVOLVENDO VIABILIDADE ECONÔMICA DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS

Esta subseção tem o intuito de relacionar o uso da Engenharia Econômica às tecnologias utilizadas para a geração de energia elétrica a partir de biogás. Isto com a finalidade de melhorar o entendimento de questões específicas abordadas por outros autores sobre o presente tema,

como por exemplo, quais métodos de Engenharia Econômica são predominantemente aplicados nos estudos, bem como, quais variáveis financeiras são igualmente importantes.

No estudo desenvolvido pela ARCADIS (2010), foi simulado e analisado o potencial agregado de geração de energia a partir de biogás provindo de resíduos de saneamento de 56 locais de depósito de resíduos no Brasil, entre aterros sanitários, aterros controlados e vazadouros a céu aberto. O método do VPL demonstrou a viabilidade do projeto com resultados positivos e expressivos.

Ferella et al. (2018) desenvolveram seu trabalho baseado em uma planta de biogás já existente, onde é proposta a análise para uma provável expansão da planta para conversão do biogás em biometano, com finalidade de uso como combustível em veículos. Foi realizada uma análise econômica utilizando fluxo de caixa descontado, onde o método VPL foi o principal indicador considerado. Lee (2017), ao analisar oito possíveis cenários para a utilização do biogás como forma de energia, entre eles o método de geração de energia elétrica e calor combinados (CHP), utiliza de índices econômicos como VPL, TIR, LCOE, entre outros, para chegar às conclusões sobre a análise de viabilidade econômica das opções de investimento apresentadas.

Lauer et al. (2018) analisam a utilização de resíduos para a geração de energia em fazendas produtoras de leite nos Estados Unidos, concluindo que, mesmo com os baixos preços de energia elétrica do estado onde se realizou o estudo, o método apresenta um VPL positivo e atrativo. Isso além da redução notória do impacto ambiental causado pela atividade pecuária. Govender, Thopil e Inglesi-Lotz (2018) fazem uma comparação a respeito da realidade da utilização do biogás como fonte de energia elétrica na África do Sul e na Alemanha. Como base do estudo financeiro e econômico é utilizada uma grande companhia petroquímica que apresentou VPL negativo e TIR insuficiente perante a utilização do biogás para obtenção de energia elétrica. Dentre as conclusões os autores pontuam que a Alemanha já vem fazendo investimentos no setor há mais tempo, além de possuir energia elétrica da rede mais cara, o que facilita a viabilidade de projetos.

Em seu estudo em uma propriedade de suinocultura no interior do estado do Paraná, Avaci et al. (2013), levam em consideração variáveis como custo de aquisição dos biodigestores e equipamentos, gasto anual com biogás, produção de eletricidade pela planta de biogás, entre outros, e utiliza o VPL, a TIR e o PBD. Após simular diferentes períodos de funcionamento de geração de energia a partir do biogás dos resíduos orgânicos da propriedade, constatou-se que quando não há venda de créditos de carbono o VPL torna-se positivo, mas com o tempo de retorno do investimento de 15 anos e com o tempo de produção de 20 horas diárias. Já quando

há venda de créditos de carbono, o VPL torna-se positivo com um tempo de retorno de 10 anos e com uma produção diária de 16 horas. Ainda, o produtor deixou de gastar aproximadamente R\$ 145.854,00 anualmente com fertilizantes, ao utilizar o subproduto orgânico do biodigestor como substituto.

Barros, Tiago Filho e da Silva (2012) desenvolveram um estudo em que 15 cenários foram simulados, com diferentes capacidades de plantas termoelétricas, com variados períodos de operação, abrangendo populações hipotéticas de 80 mil a 500 mil habitantes no Brasil. O estudo desenvolveu equações que relacionaram a população abrangida pelo aterro sanitário, e consequentemente pela planta termoelétrica, viabilidade de potência instalada para determinada população e a TIR correspondente para cada cenário criado. O estudo chegou à conclusão de que, as plantas termoelétricas alimentadas por biogás se tornam viáveis apenas para situações em que a população abrangida é maior do que 200 mil habitantes, alcançando uma TIR maior que 10% ao ano. Os autores ainda apontam como sugestão a atualização das políticas públicas brasileiras referentes ao setor, o que poderia tornar viável a implementação de projetos que atendam um número menor de consumidores.

Nadaleti (2019) realizou um estudo de caso em uma indústria de arroz parboilizado no estado do Rio Grande do Sul com produção anual de 90.000 toneladas de arroz. O estudo baseia-se em determinar a potencialidade de geração energética a partir de um sistema CHP, alimentado com biogás de resíduos sólidos e efluentes. O potencial anual estimado de geração a partir do metano produzido é de 850 MWh de energia elétrica e 970 MWh de energia calorífica simultaneamente, sendo o consumo elétrico anual da indústria analisada de 7.200 MWh. Foi constatado o custo de geração de energia elétrica do biogás de 0,05 R\$/KWh, em comparação a um custo de compra de energia da rede de 0,3218 R\$/KWh. O VPL se apresenta positivo e com valor de R\$ 1.245.370,00, com uma TIR de 68,26% ao ano e o *Payback* de 2 anos.

Ayodele, Ogunjuyigbe e Alao (2018) consideram em seu estudo dois métodos de aproveitamento de biogás para geração de energia elétrica em um aterro sanitário de uma cidade com população de 2.550.593 habitantes na Nigéria, sendo eles: 1. A simples captação do biogás gerada no aterro; 2. A construção de um biodigestor onde seriam destinados os resíduos específicos para a geração de tal gás. Ambas as opções se demonstraram viáveis, sendo que o método 1 apresentou um VPL de US\$ 489,26 milhões, TIR de 23,4% ao ano e *Payback* de 6,72 anos; já o método 2 apresentou VPL de US\$ 834,12 milhões, TIR de 19,3% ao ano e *Payback* de 5,21 anos.

Aydi et al. (2015) desenvolveram um estudo de caso para avaliar a viabilidade da utilização do biogás em um aterro sanitário próximo à cidade de Tunes, capital da Tunísia. O aterro sanitário em estudo recebe em torno de 1.800 toneladas por dia de resíduos sólidos municipais, valor que representa 40% do total de resíduos dessa categoria gerados nacionalmente, tornando-o o maior aterro sanitário no país. Os resíduos recebidos diariamente são compostos basicamente de rejeitos orgânicos (65%), papel e papelão (12%) e outros. O sistema coletor de gás, instalado em 2008, consiste em 89 poços espaçados em centros de 35 metros, onde o gás é direcionado dos poços para o sistema por um sistema de sucção, que termina em dois *flares*, com capacidade de 3000 Nm³/h. A simulação resultou em VPL positivo de \$ 5.812.618,00, e TIR de 24,4% ao ano, uma geração de energia elétrica de 255 MWh e uma redução da emissão de 8,14x10⁷ tCO₂eq.

Garibay-Rodriguez et al. (2018) realizaram um estudo de caso sobre a produção de energia elétrica em um aterro sanitário de uma cidade com aproximadamente 500 mil habitantes, localizada na região central do México, que gera em torno de 400 toneladas por dia de resíduos sólidos municipais. Em 2013, cerca de 110.000 toneladas foram coletadas e alocadas no aterro. Em 2016 foram geradas 132.446 toneladas no município e há uma previsão de acúmulo no final de 2030 de 2.077.930 toneladas. De acordo com o estudo, o máximo VPL para o aterro sanitário é encontrado quando há captação do biogás para conversão em energia elétrica. No 9º ano, as receitas líquidas anuais passam a ser positivas, produzindo 191.400,55 MWh de energia elétrica em seu ponto ótimo.

Dos Santos, Barros e Tiago Filho (2018) aplicaram métodos de análise de viabilidade econômica para determinar o número ótimo de geradores a serem utilizados na conversão de biogás em energia elétrica em um aterro sanitário na cidade de Itajubá, localizada em Minas Gerais. Os métodos utilizados levaram à conclusão de que o menor LCOE, de 71,5 US\$/MWh, é obtido na utilização de somente um gerador e, embora a produção de energia seja menor, é o cenário mais atrativo economicamente. A utilização de dois geradores demonstra um VPL 45,3% menor, porém uma produção de energia elétrica 25,6% maior, demonstrando que o atual ambiente econômico é desfavorável à adição de mais módulos geradores, embora uma eficiência energética maior seja apresentada. Os autores frisam que a comercialização de créditos de carbono leva a um aumento significativo no VPL, levando a cenários atrativos com até três geradores simultâneos, viabilizando economicamente uma maior produção energética.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção tem a finalidade de explicar sobre os métodos de pesquisa deste trabalho. Esta seção divide-se em três subseções, sendo: cenário; métodos de pesquisa e; etapas de pesquisa.

3.1 CENÁRIO

O estudo aqui proposto foi realizado com base em dados de um aterro sanitário localizado no estado do Rio Grande do Sul. A empresa analisada coleta resíduos sólidos municipais, sendo que parte do material coletado é destinado a uma planta de aproveitamento de biogás, que está em fase de testes. Aproximadamente 44,4% da área total do aterro sanitário são utilizadas para destinação de resíduos, apresentando uma capacidade de 1000 toneladas por dia e uma vida útil de 20 anos. O restante do terreno é utilizado como área de preservação, com o plantio e a manutenção da flora e da fauna nativas.

O foco de análise nesta pesquisa é a planta geradora de energia elétrica a partir do biogás gerado pelos resíduos coletados neste aterro. A planta está em processo de implementação na empresa supracitada. Espera-se que os 1000 Nm³/h de biogás extraídos atualmente pela empresa sejam triplicados com uma ampliação das atividades, podendo assim alimentar quatro geradores de 1 MW cada.

3.2 MÉTODOS DE PESQUISA

Marconi e Lakatos (2017) definem pesquisa como um procedimento formal, que busca conhecer a realidade total ou parcial, a partir de um método científico e reflexivo de pensamento. A presente pesquisa na área de engenharia classifica-se de natureza aplicada, pois seguindo as definições de Gil (2018), é uma pesquisa voltada a uma aplicação em uma situação específica, buscando a aquisição de conhecimentos relacionados a tal aplicação. Ainda conforme Gil (2018), a presente pesquisa demonstra objetivo descritivo, pois se pretendeu descobrir as relações entre variáveis como despesas, custos e receitas do fenômeno estudado.

Ao analisar a forma de abordagem de pesquisa, pode-se averiguar um caráter quantitativo, pois como Estrela (2018) explica, demonstra-se uma busca por explicação objetiva, baseando-se em dados numéricos. Adotando as definições de Miguel (2012), o procedimento técnico da pesquisa desenvolvida se define como modelagem e simulação, onde

foram feitos cruzamentos de dados coletados e simulados seus comportamentos ao longo do tempo em diferentes cenários.

3.3 ETAPAS DE PESQUISA

Levando em consideração a pesquisa bibliográfica realizada, foi possível verificar as abordagens utilizadas por autores no que tange aos dados empregados nos cálculos e métodos adotados nas análises econômicas. Assim, optou-se por utilizar os métodos de análise de viabilidade econômica apresentados nos estudos aqui considerados, sendo os métodos: VPL, TIR, *Payback* Descontado e LCOE. Em relação às informações empregadas nos cálculos, foram utilizados os seguintes dados para o desenvolvimento do trabalho: custos de aquisição e instalação dos equipamentos necessários à captação e conversão do biogás em energia elétrica; custo médio de operação, manutenção e depreciação dos equipamentos; receitas médias atreladas ao processamento do biogás; taxa mínima de atratividade; correção monetária.

Os dados relativos à aquisição e instalação dos equipamentos foram apresentados pela empresa foco do trabalho, bem como os dados de custo médio mensal de produção e manutenção, englobando em sua composição a depreciação dos equipamentos. A empresa também forneceu a média mensal das receitas atreladas ao processamento do biogás.

Já o valor da TMA foi definido pelo rendimento médio mensal da poupança nos últimos cinco anos, calculado a partir de dados da Calculadora do Cidadão (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2019). A poupança demonstra ser um investimento seguro e simples, além de gratuito e livre de desconto de imposto de renda, sendo esses os motivos principais para ser definida como a TMA neste trabalho. A Calculadora do Cidadão (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2019) foi utilizada, ainda, como base de dados para a correção monetária levada em consideração no presente trabalho, que foi definida pela taxa média anual dos últimos dez anos, tendo como correção o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), calculado pelo IBGE.

O horizonte de análise utilizado para o corrente estudo é de 16 anos, sendo esse o período definido estrategicamente pela empresa foco do estudo como sendo a vida útil do aterro sanitário e da planta geradora de energia. Ao se alcançar esse período, será necessária uma nova análise, devido a possíveis alterações tanto na composição dos resíduos sólidos gerados e coletados, e o conseqüente volume de biogás gerado.

Finalizada a coleta de dados, teve início a modelagem e simulação de cenários. Os cenários foram modelados cruzando as informações obtidas com variadas possibilidades de geração de biogás e energia elétrica a médio e longo prazo. Após, foram utilizados os métodos

de VPL, TIR, *Payback* descontado e LCOE. Ressalta-se que para os cálculos foi utilizado o *software Microsoft Excel 2016®*, além do apoio de linguagem Python para o desenvolvimento das etapas, cálculos, previsões e das plotagens gráficas. Por último os resultados foram apresentados e analisados para se chegar a uma conclusão sobre a pergunta estabelecida no problema de pesquisa deste trabalho.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Essa seção tem o intuito de demonstrar os resultados obtidos a partir dos dados coletados pelo autor e a partir dos dados fornecidos pela empresa foco do presente trabalho. Para melhor compreensão da abordagem utilizada na busca dos objetivos desse estudo, foram criadas subseções, que são apresentadas a seguir. A primeira subseção demonstra os dados coletados junto à empresa foco do trabalho e os dados oriundos de coletas realizadas pelo autor. Já a segunda subseção apresenta os resultados obtidos em relação às análises de viabilidade econômica e LCOE. A terceira subseção analisa os resultados obtidos.

4.1 COLETA DE DADOS

Esta subseção irá demonstrar os dados coletados para o desenvolvimento do estudo, e para melhor entendimento, foi separada em duas partes. Inicialmente serão abordados os dados técnicos de geração da planta analisada, bem como os possíveis cenários futuros propostos pelo autor. Na segunda parte, são apresentados os dados utilizados como base dos cálculos de análise econômica.

4.1.1 Dados do consumo de biogás e geração de energia elétrica

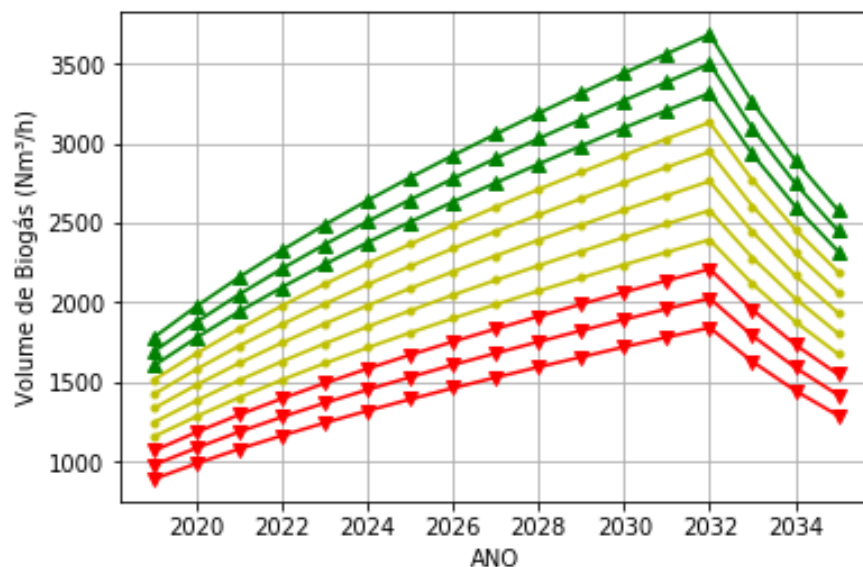
A planta de geração de energia elétrica analisada possui, levando em consideração a eficiência do sistema, uma potência real de aproximadamente 3,88MW. Esse valor representa um rendimento de queima em ciclo Otto de 40% e um funcionamento dos motores a 97% da potência nominal, de acordo com a empresa foco do estudo. Assim, o sistema instalado permite a geração máxima de 28.479 MWh em um ano, considerando sua eficiência e 130 horas de paradas programadas para manutenção preventiva ao longo do ano. O custo de instalação da planta apresentado pela empresa é de aproximadamente R\$ 30.000.000,00. A empresa apresentou como projeção uma receita média mensal de R\$ 814.800,00 e como projeção um

total de custo médio mensal de R\$ 570.360,00, diretamente proporcional ao volume de biogás gerado, levando em consideração o cenário mais otimista. Contudo, a plena utilização da capacidade de geração do sistema está diretamente ligada à quantidade de biogás gerado, captado e processado.

Para melhorar a análise econômica, devido às incertezas ligadas à quantidade de biogás gerado, captado e processado, foram desenvolvidos pelo autor 11 cenários de diferentes volumes de geração e de captação de biogás. Os cenários têm o intuito de ampliar a visão da empresa a respeito das possibilidades de comportamento futuro da geração de biogás e sua relação com o investimento realizado, sendo que a empresa informou possuir apenas a projeção de geração de biogás para um cenário otimista e para um cenário conservador.

Ainda, os 11 cenários estão demonstrados graficamente na Figura 1, tendo como base dados das estimativas fornecidas pela empresa, bem como o horizonte de 16 anos previsto estrategicamente pela empresa como apto a funcionamento da planta. Foram definidas três diferentes classificações, sendo elas: otimista, intermediário e pessimista, caracterizados no gráfico pelas cores verde, amarelo e vermelho, respectivamente.

Figura 1 - Cenários de geração de biogás ao longo do tempo



Fonte: Autor (2019).

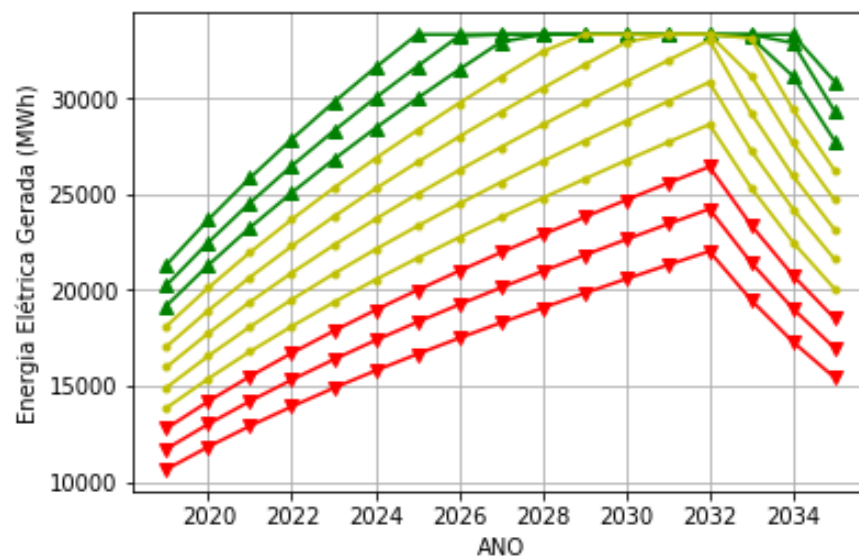
Segundo informações fornecidas pela empresa, a capacidade máxima de processamento da planta é de 2.800 Nm³/h de biogás, portanto, nesse ponto alcançando a máxima geração de energia elétrica que o sistema está apto a desenvolver. O volume de biogás gerado pelos resíduos sólidos varia de acordo com fatores como composição dos resíduos sólidos e

temperatura. Assim, o desenvolvimento e a análise de diferentes cenários se mostram importantes na tentativa de prever o comportamento do montante de biogás gerado na unidade. Foi considerada uma variação de múltiplos de 5% na geração de biogás a partir da projeção mais otimista de geração fornecida pela empresa, tida como 100%, até um cenário de 50% de geração da capacidade total, tendo este número sido proposto pela empresa foco do estudo.

A geração de energia elétrica sofre variação direta e proporcional à variação do volume de biogás captado, e conseqüentemente processado, e esse comportamento pode ser averiguado nos diferentes cenários criados. Os valores de energia elétrica gerados estão demonstrados graficamente na Figura 2, e foram classificados seguindo o mesmo critério de cores da Figura 1.

Ainda, pode-se observar que 6 cenários alcançam a capacidade máxima de geração de energia do sistema de 33.317 MWh, porém diferem-se entre si no tempo para alcançar essa geração e no número de períodos que conseguem mantê-la. O biogás gerado além da capacidade máxima de processamento da unidade geradora de energia elétrica é tido como excedente, e queimado em *flare*. Vale ressaltar que o método de queima em *flare* é o procedimento padrão de processamento utilizado hoje pela empresa para o tratamento do biogás gerado pelos resíduos sólidos, e posterior descarte na atmosfera. Essa utilização se dá pelo fato desse processo resultar em um produto que causa uma menor contaminação da atmosfera, além de representar um aumento da segurança, por possuir um menor teor inflamável que o do biogás.

Figura 2 - Cenários de geração de energia elétrica ao longo do tempo



Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Dados das taxas de juros e inflação

Como definido anteriormente no presente estudo, como Taxa Mínima de Atratividade será utilizada a média simples do rendimento anual da caderneta de poupança nos últimos 5 anos. Os dados foram coletados na Calculadora do Cidadão (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2019). Assim, a partir dos dados apresentados na Tabela 1, obteve-se um valor de 6,93% a.a., tido como base para a TMA.

Tabela 1 – Rendimento anual da poupança

Ano	2018	2017	2016	2015	2014
Rendimento da poupança (% a.a.)	4,62	6,61	8,30	8,07	7,07

Fonte: Banco Central do Brasil (2019).

A taxa de inflação a ser utilizada na obtenção dos resultados desse estudo, como já definido anteriormente, teve como base a taxa média anual dos últimos 10 anos o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) divulgado pelo IBGE e apresentadas na Calculadora do Cidadão (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2019). Os valores obtidos são demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Inflação anual pelo IPCA

Ano	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009
Taxa de inflação (% a.a.)	4,07	3,24	6,69	12,08	7,73	6,49	6,75	7,10	6,79	5,09

Fonte: Banco Central do Brasil (2019).

A partir do período analisado obteve-se uma média de 6,6% a.a., sendo esse o valor considerado como base para a correção monetária.

4.2 RESULTADOS

Na presente subseção são apresentados os resultados obtidos pelo autor, tendo sido divididos em duas principais partes. A primeira parte apresenta o resultado da viabilidade econômica dos cenários desenvolvidos para o projeto, demonstrando o período de *Payback* Descontado, a TIR e o VPL de cada cenário considerado. Já na segunda parte é apresentado o LCOE do investimento, métrica de precificação e comparação entre tecnologias definida

anteriormente no presente trabalho, utilizada especificamente para projetos que abordam o setor energético.

4.2.1 Resultados da análise de viabilidade econômica

Tendo como base os dados levantados e os métodos de cálculo previamente apresentados no trabalho, foi possível desenvolver a análise de viabilidade econômica de 11 diferentes cenários. Esses cenários levaram em conta os variados volumes de biogás captados ao longo do tempo, bem como as diferentes quantias de energia elétrica obtidas a partir dessas variações de volume.

Foram utilizados dados anuais de receita, custos e despesas, corrigidos pela média anual das taxas de inflação apresentadas na Tabela 2. O horizonte de tempo analisado é de 16 anos, tempo definido estrategicamente pela empresa como limite para as operações. A TIR, o VPL e o tempo de *Payback* Descontado para cada cenário são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise de viabilidade econômica de cenários

Classificação	Cenário	Payback (anos)	TIR (% ao ano)	VPL (R\$)
Otimista	1	8,21	18,5	39.291.424,67
Otimista	2	8,55	17,7	35.924.066,57
Otimista	3	8,94	16,8	32.556.708,46
Intermediário	4	9,35	16,0	29.189.350,36
Intermediário	5	9,81	15,1	25.821.992,26
Intermediário	6	10,32	14,2	22.454.634,15
Intermediário	7	10,9	13,3	19.087.276,05
Intermediário	8	11,5	12,3	15.719.917,95
Pessimista	9	12,29	11,2	12.352.559,84
Pessimista	10	13,15	10,2	8.985.201,74
Pessimista	11	14,12	9,0	5.617.843,64

Fonte: Autor (2019).

Conforme apresentado na Tabela 3, pode-se verificar que todos os cenários analisados apresentam um VPL positivo, bem como a TIR superior ao valor adotado como TMA. Isso demonstra a viabilidade econômica do projeto, mesmo nos cenários propostos como pessimistas na geração de energia elétrica. Ainda, pode-se verificar o teor decrescente da viabilidade econômica do projeto em sincronia com a diminuição do volume projetado de processamento de biogás nos cenários simulados.

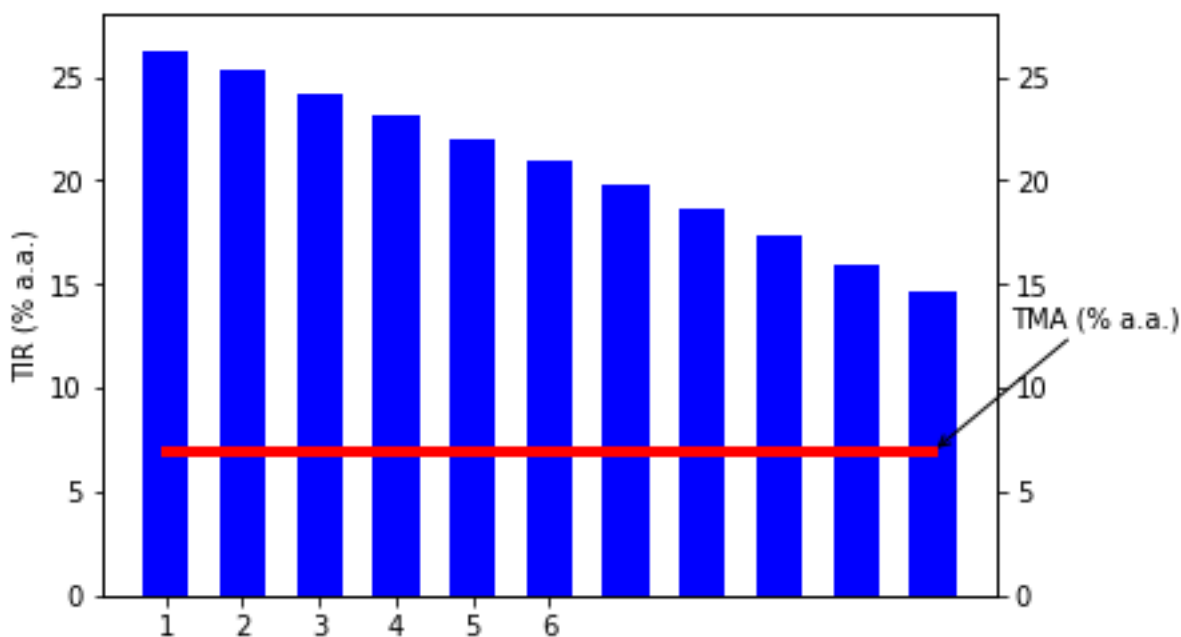
4.2.2 Resultados do cálculo do LCOE

Conforme apresentado anteriormente, o método LCOE representa o custo, em reais, por KWh gerado no empreendimento. Foram utilizados os valores fornecidos pela empresa a respeito das despesas com equipamentos, vida útil, custos de manutenção, custos de operação, custo de implementação e demais despesas/custos atrelados. Assim, obteve-se um LCOE de R\$ 0,58/KWh, sendo esse valor considerado para todos os cenários desenvolvidos no estudo.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir da análise dos resultados observados nos cenários propostos, pode-se apontar a viabilidade econômica como positiva para todos os 11 cenários analisados. Essa análise provém do fato de que todos os cenários apresentam VPL positivo e TIR maior que a TMA proposta, mesmo considerando os cenários tidos como pessimistas na geração de biogás. Apenas para fins de comparação, foi desenvolvido um gráfico para análise visual comparativo entre a TIR de cada cenário e a TMA, onde a TIR de cada cenário encontra-se em azul e a TMA em vermelho.

Figura 3 – Gráfico comparativo entre TMA e TIR dos cenários simulados



Fonte: Autor (2019).

A TIR obtida nos cenários do presente estudo apresenta valores próximos a alguns estudos utilizados como base pelo autor, como o estudo desenvolvido por Govender, Thopil e Inglesi-Lotz (2019) sobre a geração de energia elétrica a partir de biogás na África do Sul, em que o cenário pessimista apresenta uma TIR de 7,6% ao ano. Porém, valores substancialmente menores ao serem comparados com a TIR (de 68,26% ao ano) obtida na análise de Nadaleti (2019) no uso de resíduos de indústrias de arroz na geração de energia na forma de eletricidade e calor. Na mesma faixa tem-se a TIR de 172,6% ao ano em um cenário específico analisado por Lee (2017) no processo de transformação de biogás em biometano.

Ainda, pode-se analisar que os valores de VPL encontrados pelo autor nos cenários intermediários, corrigidos pela cotação apresentada pelo Banco Central do Brasil (2019b), é muito próximo ao VPL de \$ 5.182.618,00 demonstrado por Aydi (2015), em seu estudo de geração de energia elétrica a partir de biogás em aterro sanitário na Tunísia. Já o estudo apresentado por Barros, Thiago Filho e Da Silva (2013) com a mesma finalidade em um aterro sanitário no Brasil, não obteve VPL positivo.

O estudo de Ayodele (2018) sobre a geração de energia elétrica em um aterro sanitário na Nigéria demonstrou um *Payback* de 6,72 anos, um LCOE de \$ 0,24 no primeiro ano e uma TIR de 23,44% ao ano. Esses valores, demonstram-se mais atrativos economicamente em comparação aos resultados encontrados no presente estudo, porém, demonstram compatibilidade.

É possível ressaltar que, mesmo os estudos que demonstraram cenários não viáveis economicamente, apresentam valores e comportamentos não muito destoantes do estudo aqui demonstrado. Assim, pode-se afirmar a semelhança entre os resultados alcançados pelo autor com os de estudos já publicados na área, trazendo um quesito de confiança para a metodologia e abordagem aqui utilizada.

5 CONCLUSÃO

O trabalho de conclusão de curso aqui apresentado teve como intuito realizar a análise da viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir de biogás gerado em aterro sanitário, caracterizado como seu objetivo principal. Foram utilizados métodos de análise econômica observados em outros estudos da área, sendo eles o VPL, a TIR, o *Payback* Descontado e o *LCOE*. Estes foram aplicados em cenários simulados e criados pelo autor com base em estimativas e dados cedidos pelo aterro sanitário foco do estudo. Esses cenários apresentam os variados comportamentos da geração de biogás no aterro sanitário, e a

consequente variação da geração de energia elétrica na planta geradora em implementação pela empresa.

A partir da análise dos resultados obtidos pôde-se concluir que os 11 cenários analisados são viáveis economicamente, e que o investimento se demonstra atrativo no ponto de vista financeiro. Além disso, pode-se ressaltar a importância ambiental do correto manejo dos resíduos sólidos urbanos e do biogás gerado pelos mesmos, não abordados no presente trabalho por razão da delimitação ao enfoque econômico do estudo.

Assim, os objetivos propostos no presente trabalho foram cumpridos ao demonstrar que há viabilidade econômica na geração de energia elétrica a partir de biogás gerado no aterro sanitário, e que, quanto maior a geração de biogás a partir dos resíduos sólidos contidos no aterro, maior é o retorno financeiro do projeto. Para futuros trabalhos sugere-se a oportunidade de se analisar economicamente potenciais utilizações mistas para o biogás, aliando a utilização na geração de energia elétrica à possível comercialização do biogás para fins diversos, como o seu processamento em biometano e demais subprodutos, além da influência de fatores climáticos na geração do biogás. Ainda, seria importante o estudo dos âmbitos sociais e ambientais que tangenciam a tecnologia aqui abordada, aliando os resultados econômicos aos possíveis impactos sociais e ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABDELHADY, S.; BORELLO, D.; SHABA, A. Techno-economic assessment of biogas power plant fed with rice straw: sensitivity and parametric analysis of the performance and the LCOE. **Renewable Energy**, v. 115, p. 1026-1034, 2018.
- ACHINAS, S.; ACHIVNAS, V.; EUVERINK, G. J. W. A technological overview of biogas production from biowaste. **Engineering**, v. 3, n. 3, p. 299-307, 2017.
- APPEL, F.; OSTERMEYER-WIETHAUP, A.; BALMANN, A. Effects of the German Renewable Energy Act on structural change in Agriculture - The case of biogas. **Utilities Policy**, v. 41, p. 172-182, 2016.
- ARCADIS, **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. 2010. Disponível em: <
http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2019.
- AVACI, A. B. et al. Avaliação econômico-financeira da microgeração de energia elétrica proveniente de biogás da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 456-462, 2013.
- AYDI, A. et al. Assessment of electrical generation potential and viability of gas collection from fugitive emissions in a Tunisian landfill. **Energy Strategic Reviews**, v. 8, p. 8-14, 2015.
- AYODELE, T. R.; OGUNJUYIGBE, A. S. O.; ALAO, M. A. Economic and Environmental Assessment of Electricity Generation using Biogas from Organic Fraction of Municipal Solid Waste for the City of Ibadan, Nigeria. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 718-735, 2018. Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618326337>>. Acesso em: 13 maio de 2019.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do Cidadão**. 2019. Disponível em: <
<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=xibirFormCorrecaoValores>>. Acesso em: 02 maio de 2019.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotações**. 2019b. Disponível em: <
<https://internacional.bb.com.br/displayRatesBR.bb>>. Acesso em: 02 nov de 2019
- BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; DA SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 45, p. 150 – 164, 2013.
- BLANK, L. T.; TARQUIN, A. **Engineering economy**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Energia no Mundo 2015-2016**. 2017. Disponível em: <
<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/14+-+Energia+no+Mundo+-+Matrizes+e+Indicadores+2017+-+anos+ref.+2015+-+16+%28PDF%29/60755215-705a->>

4e76-94ee-b27def639806;jsessionid=23A29A5505323A1DD0ED0E7D02E956E2.srv155>. Acesso em: 26 set. 2018.

BRUCK, M.; SANDBORN, P.; GOUDARZI, N. A Levelized cost of energy (LCOE) model for wind farms that include Power Purchase Agreements (PPAs). **Renewable Energy**, v. 122, p. 131-139, 2018.

CAN, H.; KORKMAZ, Ö. The relationship between renewable energy consumption and economic growth: The case of Bulgaria. **International Journal of Energy Sector Management**, 2019. Disponível em: <
<https://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/IJESM-11-2017-0005>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. H. **Análise de investimentos**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS-BIOGÁS. **Relatório do Biogás e Biometano do Mercosul**. 2017. disponível em:
<https://www.passeidireto.com/arquivo/36475467/relatorio-de-biogas-e-biometano-do-mercosul-2017>. Acesso em: 6 mar. 2019.

DICIONÁRIO FINANCEIRO. **O que é depreciação na contabilidade?**. Disponível em: <
<https://www.dicionariofinanceiro.com/depreciacao/>>. Acesso em: 02 maio de 2019.

DOS SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L. Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. **Suitable Cities and Society**, v. 41, p. 587-600, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2007. Disponível em: <
<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139260/Plano+Nacional+de+Energia+2030+%28PDF%29/ba957ba9-2439-4b28-ade5-60cf94612092;jsessionid=892D75CCF7B68DAC2299640553193BEE.srv155>>. Acesso em: 6 mar. 2019.

_____. **Balanco Energético Nacional**. 2018. Disponível em: <
<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em: 6 mar. 2019.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas - SP**. 219 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003.

ESPA, I; DURÁN, G. M. Renewable Energy Subsidies and WTO Law: Time to rethink the case for reform beyond Canada – Renewable Energy/Fit Program. **Journal of International Economic Law**, v. 21, p. 621-653, 2018.

ESTRELA, C. (Org.). **Metodologia Científica: Ciência, Ensino, Pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Artes Médicas, 2018.

FERELLA, F. et al. A techno-economic assessment of biogas upgrading in a developed market. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 945-957, 2019.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – Estudo de caso**. 147 p. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.

GARIBAY-RODRIGUEZ, J. et al. Optimal municipal solid waste energy recovery and management: a mathematical programming approach. **Computers & Chemical Engineering**, v. 119, p. 394-405, 2018.

GATZERT, N.; KOSUB, T. Risk and risk management of renewable energy projects: the case of onshore and offshore wind parks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 982-998, 2016.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

GOVENDER, I; THOPIL, G. A.; INGLES-LOTZ, R. Financial and Economic appraisal of a biogas to electricity project. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 154-165, 2019.

GUO, J. et al. Thermal modelling of the completely stirred anaerobic reactor treating pig manure at low range of mesophilic conditions. **Journal of Environmental Management**, v. 127, p. 18-22, 2013.

HAKAWATI, R. et al. What is the most energy efficient route for biogas utilization: heat, electricity or transport? **Applied Energy**, v. 206, p. 1076-1087, 2017.

HEINICKE, M. Framework for the use of landscaping waste for alternative energy generation. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 9, n. 1, p. 57-76, 2015.

HIRSCHFELD, H. **Engenharia Econômica e Análise de Custos**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 1989.

KALOGIROU, S. A. Building integration of solar renewable energy systems towards zero or nearly zero energy buildings. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 10, p. 379-385, 2015.

KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. Waste to energy status in India: a short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 113-120, 2014.

KETOLA, T.; SALMI, T. Sustainability life cycle comparison of biofuels: sewage, the saviour? **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 21, n. 6, p. 796-811, 2010.

LAUER, M. et al. Making money from waste: the economic viability of producing biogas and biomethane in the Idaho dairy industry. **Applied Energy**, v. 222, p. 621-636, 2018.

LEE, D. Evaluation the financial feasibility of biogas upgrading to biomethane, heat, CHP and AwR. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 45, p. 27718- 27731, 2017.

- LEVITT, A. C. et al. Pricing offshore wind power. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, p. 6408-6421, 2011.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MELO, M. S. M. **Energia eólica: aspectos técnicos e econômicos**. 157 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- MERESSI, F. S.; SILVA, M. F. S. Mobilidade Socioeconômica no Brasil, padrão de consumo e conflitos socioambientais. **Economia e Sociedade**, v.25, n.1, p. 87-108, 2016.
- MIGUEL, P. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.
- MORGAN, H. M. et al. A techno-economic evaluation of anaerobic biogas producing systems in developing countries. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 910-921, 2018.
- MOTTA, R. R. (Org.). **Engenharia Econômica e Finanças**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2009.
- MUSTAFA, M. Y.; CALAY, R. K.; ROMÁN, E. Biogas from organic waste: a case study. **Procedia Engineering**, v. 146, p. 310-317, 2016.
- NADALETI, W. C. Utilization of residues from rice parboiling industries in southern Brazil for biogas and hydrogen-syngas generation: Heat, electricity and energy planning. **Renewable Energy**, v. 131, p. 55-72, 2019.
- NEWNAN, D. G.; LAVELLE, J. P.; ESCHENBACH T. G. **Engineering Economic Analysis**. 12. ed. New York: Oxford University, 2014.
- NOROUZI, O.; DI MARIA, F.; EL-HOZ, M. A short review of comparative energy, economic, and environmental assessment of different biogas-based power generation technologies. **Energy Procedia**, v. 148, p. 846-851, 2018.
- OMAR, I.; MNCWANGO, S. Sanitary landfill energy harnessing and applications. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 3, n. 2, p. 127-139, 2005.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Report of the United Nations conference on the human environment**. Organização das Nações Unidas. Estocolmo, 1972.
- PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto residencial da USP – Estudo de caso**. 152 p. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.
- POLO, E. F. **Engenharia das Operações Financeiras**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 1996
- ROSS, S. et al. **Corporate Finance**. 10. ed. New York: The McGraw-Hill, 2015.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.; FAHL, F. Biogas: developments and perspectives in Europe. **Renewable Energy**, v. 129, p. 457-472, 2018.

SINGH, A. Renewable energy in the Pacific Island countries: resources, policies and issues. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 23, n. 3, p. 254-263, 2012.

SIQUEIRA, H. M.; SOUZA, P. M.; PONCIANO, N. J. Café convencional versus café orgânico: perspectivas de sustentabilidade socioeconômica dos agricultores familiares do Espírito Santo. **Rev. Ceres (Impr.)**, Viçosa, v. 58, n. 2, p. 155-160, 2011.

UDAETA, M. E. M. et al. Basic and procedural requirements for energy potential from biogas of sewage treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 236, p. 380-387, 2019.

UECKERDT, F. et al. System LCOE: what are the costs of variable renewables? **Energy**, v. 63, p. 61-75, 2013.