

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE VIABILIDADE FINANCEIRA DE SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE
BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS PARA A
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

por

Gabriel Marques Trujillo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE VIABILIDADE FINANCEIRA DE SISTEMAS DE APROVEITAMENTO DE
BIOGÁS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS PARA A
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

por

Gabriel Marques Trujillo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.^a Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Paulo Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Guilherme Henrique Fiorot

Prof.^a. Roberta Neumeister

Porto Alegre, 15 de junho e 2018.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família pelo apoio incondicional, pelas ótimas condições nas quais eles me educaram, pelo ambiente confortável e afetuoso. Ela foi fonte de energia e inspiração para a minha vida e este trabalho.

Agradeço ao meu professor orientador Paulo Schneider pelos ensinamentos transmitidos durante parte da minha trajetória acadêmica. Sua maneira cativante de me desafiar, questionar e indagar foram fundamentais durante a execução deste trabalho.

Impossível deixar de mencionar o Eduardo Amado, grande e fiel amigo que ajudou a construir grande parte deste trabalho através de sua maneira de pensar, de seus questionamentos e conhecimentos. És também fonte de inspiração para mim. Junto a ele, agradeço ao Arthur Büneker, ao Alexandre Simon e ao Elizeu Possamai, meus grandes parceiros de graduação que ajudaram com que eu tirasse muito mais dessa etapa do que eu conseguiria sozinho. Agradeço ao Lucas Folle e ao Renan Prates, amigos que me ajudaram a me moldar na pessoa que sou.

Agradeço ao André Fich e novamente Arthur por terem topado o desafio de criar a Empresa Júnior OTMZA, que foi o ambiente primordial para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço também a todas as outras pessoas que passaram pela EJ, que foram uma família que tive e que ajudaram a construir e desenvolver um legado do qual me orgulho muito.

Agradeço ao Movimento Empresa Júnior, formado por diversos líderes inspiradores que injetaram muita energia e conhecimento para realizar os meus sonhos. Agradeço nominalmente o Henrique Roman, o Rafael Siebiger, o Pedro Bender e a Leandra Lacerda que estiveram comigo na liderança da Federação das Empresas Juniores do Estado do Rio Grande do Sul.

Agradeço à Luming, e as pessoas que a compõe, o Rael Mairesse, o Wolf Rowell e o Daniel Luzzi, por terem me abraçado, por serem o meu mais novo desafio e por me possibilitarem realizar esse trabalho.

TRUJILLO, G. M. “**Estudo de viabilidade financeira de sistemas de aproveitamento de biogás de estação de tratamento de efluentes industriais para a produção de energia elétrica**”. 2018. 20 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Este trabalho desenvolve sistemas para aproveitamento do biogás de uma estação de tratamento de efluentes industriais de uma maltaria para produção de energia elétrica. Após um processo de pré-seleção, avaliou-se o desempenho de três sistemas sob uma ótica financeira, tomando como dados de entrada a produção horária de biogás dentro de uma semana. Os resultados obtidos demonstraram que nenhum sistema teve viabilidade financeira, sendo que aqueles que acumulam biogás os de menor valor presente líquido. Observou-se que mudanças em aspectos econômico-financeiros, como a diminuição do dólar ou o aumento da tarifa de energia, e técnicos, como um cenário envolvendo cogeração ou instalando o projeto em um local com áreas maiores, tornariam os sistemas viáveis.

PALAVRAS-CHAVE: biogás de estação de tratamento de efluentes industriais, produção de energia elétrica, produção de biogás horária.

TRUJILLO, G. M. “**Financial feasibility study of systems with use of biogas from industrial effluent treatment plant for the production of electrical energy**” 2018. 20 pages. Monograph (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

This study develops systems for the use of biogas from an industrial effluent treatment plant of a malting plant to produce electrical energy. After a pre-selection process, the performance of three systems was evaluated under a financial perspective, taking as input data the production of biogas per hour within one week. The results showed that no system was financially viable, and those that accumulate biogas had the lowest net present value. It was noted that changes in economic and financial aspects, such as a decrease in the dollar exchange rate or an increase in energy costs, and technical changes such as the possibility to work with cogeneration or installing the project in a larger area would make the systems viable.

KEYWORDS: biogas from industrial effluent treatment plant, production of electrical energy, production of biogas per hour.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	1
3. REVISÃO TEÓRICA CONCEITUAL.....	1
3.1. Processos em maltarias.....	1
3.1.1. Biogás de maltaria.....	2
3.1.2. Biogás como combustível.....	2
3.2. Utilidades do biogás.....	3
3.2.1. Usinas de cogeração.....	3
3.3. Turbina	3
3.3.1. Cálculo da energia gerada por uma turbina.....	4
3.4. Compressores	4
3.5. Acumuladores.....	5
3.6. Viabilidade financeira de projetos	5
4. METODOLOGIA.....	6
4.1. Estudo de caso	6
4.2. Abordagem conceitual	7
4.2.1. Sistemas propostos	7
4.2.2. Pré-seleção	9
4.3. Abordagem refinada	10
4.3.1. Desenvolvimento.....	10
4.3.2. Análise financeira dos sistemas.....	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
5.1. Impacto de fatores econômico-financeiros no projeto	13
5.2. Impacto de fatores técnicos no projeto.....	13
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
ANEXO I – Curva de eficiência das turbinas	16
APÊNDICE A - Dimensionamento de acumuladores de gás	17
APÊNDICE B – Centro de custos e estrutura do fluxo de caixa preliminar dos sistemas.....	18
APÊNDICE C – Centro de custos e estrutura do fluxo de caixa final dos sistemas	19

1. INTRODUÇÃO

No presente momento, o mundo está passando pelo desafio de transição da matriz de produção de energia. Esse processo tem como foco a substituição de combustíveis fósseis por fontes distintas de menor impacto ambiental, entre elas o biogás. Comparado com outros combustíveis fósseis, o biogás tem como características o fato de ser produzido localmente por fontes de descarte de matéria orgânica. Sua composição básica é uma mistura de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) [Braun, 1982]. A emissão de metano na atmosfera é até 20 vezes mais danosa à camada de ozônio do que a de CO_2 , o que justifica um rigoroso controle da emissão do biogás [Metcalf *et al.*, 2015]. É comum que ocorra sua queima em tochas, sem aproveitamento energético, com o único intuito de diminuir sua emissão.

O biogás é produzido por processos anaeróbios por meio de atividades bacterianas sobre composto orgânico. Por isso, sua coleta e aproveitamento podem ocorrer desde a concentração de grandes quantidades de biomassa do setor agropecuário, quanto em aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto ou estação de tratamento de efluentes, algo comum em vários tipos de indústrias, como as maltarias. O Brasil, por exemplo, é o 3º maior produtor de cerveja do mundo, com 13.460.000 kL produzidos em 2013, o que demonstra o enorme potencial de apenas uma das fontes de biogás a ser explorada [KIRIN, 2014].

A melhor utilização desse recurso amplamente disponível para a produção de energia elétrica é fundamental para que a transição da matriz de energia seja feita de maneira sustentável. Assim, este trabalho busca contribuir para a maior compreensão sobre o aproveitamento do biogás oriundo de processos industriais, para que possa, futuramente, ser replicado e expandido, colaborando em mais um passo nesse processo de transição.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é analisar diferentes estratégias de produção de energia elétrica a partir do biogás e selecionar, dentre as arquiteturas que forem viáveis, aquela que apresenta os melhores resultados em critérios financeiros.

Para isso, pretende-se realizar um estudo de caso a partir de dados da estação de tratamento de efluentes de uma malteria no Rio Grande do Sul com os objetivos de:

- Avaliar o desempenho dos sistemas propostos através de indicadores financeiros;
- Comparar o desempenho entre as diferentes arquiteturas;
- Analisar o impacto de fatores econômico-financeiros e técnicos nos resultados dos projetos.

3. REVISÃO TEÓRICA CONCEITUAL

Este capítulo aborda os principais aspectos teóricos presentes neste trabalho. Em primeiro lugar são descritos o funcionamento de uma malteria, seus efluentes, o tratamento destes e o biogás produzido neste processo. Em seguida são trazidos tópicos sobre a produção de energia com o biogás, compressão, acumuladores e viabilidade financeira de projetos.

3.1. Processos em maltarias

Maltarias são unidades que produzem o malte, que é resultado da germinação e da dessecação de cereais, como a cevada. Nesse processo, os grãos são lavados mais de uma vez, gerando efluentes, que são compostos de água e resíduos orgânicos [Briggs, 1998]. Esse efluente deve ser tratado com o intuito de entregar a água dentro dos limites de descarga de efluentes, retirando conteúdo orgânico sólido, biogás e compostos de nitrogênio da água. As características desse biogás produzido dependem de seu conteúdo orgânico, do seu processo

de decomposição e do tratamento da água. O tratamento se inicia através da decomposição por processos anaeróbios, que ocorrem dentro de um reator. Os modelos mais utilizados de reator são o reator anaeróbio de manto de lodo e fluxo ascendente e o reator de circulação interna. Neste estudo foi abordado apenas o reator de circulação interna.

O reator de circulação interna é uma estrutura em formato cilíndrico que possui duas zonas por onde passa o efluente: a do leito expandido de lodo na parte inferior e a de polimento na superior. O efluente entra no reator na zona do leito expandido de lodo, onde a matéria orgânica é decomposta. O lodo decanta na parte inferior, onde será eventualmente recolhido, e a mistura água e biogás ascende. Ela passa por um módulo separador, o qual absorve a maioria do biogás com quantidade de água, que sobe até o topo do reator. Lá o biogás é separado da água numa câmara, onde o biogás sai do reator e a água desce para recircular no reator. A mistura que passou pelo módulo separador ascende para a zona de polimento e chega em um segundo módulo separador, que remove o restante do biogás presente na água. Esse biogás removido ascende ainda com umidade, para então ser separado, como no módulo separador inferior. A água que passa pelo segundo módulo separador sai do reator e é direcionada para outros tratamentos. Esse processo faz com que a água tratada fique com pouco conteúdo de biogás e o biogás com baixa umidade. [Habets, 2018].

3.1.1. Biogás de maltaria

O biogás oriundo de maltarias é uma mistura de 60 até 90% de volume de CH_4 , sendo o restante do volume formado por CO_2 , mais traços de outros gases. Esses demais gases, apesar de estarem presentes em menores proporções são importantes, já que podem ser tóxicos, corrosivos ou apresentar outras características maléficas para um projeto com a sua utilização, como é o caso do sulfeto de hidrogênio (H_2S), o siloxano e a amônia [Braun, 1982]. Seus limites aceitáveis irão depender do equipamento que o utilizará e de seu material. Os compostos presentes e suas quantidades são consequência da matéria orgânica, no caso os grãos, da ação de bactérias anaeróbias e do processo de tratamento da água.

A redução da emissão de gás carbônico é um dos temas mais propagados para diminuição do aquecimento global devido à sua alta taxa de emissão, porém se comparado ao metano, o CO_2 é cerca de vinte vezes menos danoso por unidade emitida. Isto ocorre devido à alta eficiência do CH_4 na captação de radiação, fazendo com que o controle na emissão dele seja crítico para amenizar o efeito estufa [Metcalf *et al.*, 2015]. Portanto, a solução comum adotada é a queima direta do biogás em tocha de segurança, sem recuperação energética. Alternativamente existem unidades que recuperam parte da energia térmica para cumprir uma demanda na planta ou ainda o utilizam como combustível em geradores de energia elétrica.

3.1.2. Biogás como combustível

O poder calorífico é definido como máximo calor liberado por unidade de massa ou volume (kJ/kg ou kJ/m^3). Quando utilizado em base volumétrica, é necessário indicar as condições de temperatura e pressão de referência. Da mesma maneira, com o dado de poder calorífico e de volume do combustível, pode-se obter o calor entregue pelo mesmo.

O poder calorífico de um combustível pode ser classificado como inferior (PCI) ou superior (PCS). O PCI é dado pela energia liberada na forma de calor, e o PCS soma a energia gasta na vaporização da água na reação. O PCI costuma ser mais utilizado nos processos de combustão por fornecer a informação da energia que será entregue pelo combustível, sendo seu valor tabelado conforme o composto químico. O PCI do biogás dependerá diretamente do CH_4 , que é o principal combustível na sua composição.

3.2. Utilidades do biogás

Seu poder calorífico e sua abundante disponibilidade tornam o biogás atraente para diversas aplicações. Entre elas está a geração de energia elétrica em usinas de cogeração, sua utilização como fonte de energia térmica, injeção na rede de gás natural e seu aproveitamento como combustível de veículos. Como o objetivo deste trabalho é a produção de energia elétrica, foi abordado apenas a aplicação em usinas de cogeração.

3.2.1. Usinas de cogeração

A cogeração é a geração simultânea de eletricidade e calor. Conforme as suas características, as usinas de cogeração se dividem em dois tipos: aquelas que produzem principalmente calor e aquelas com ênfase na produção de eletricidade. Na maioria das aplicações se utiliza motogeradores ou microturbinas.

Os motogeradores são constituídos de motores de combustão, um gerador para conversão elétrica, trocadores de calor, circuito de arrefecimento e óleo lubrificante. A sua aplicação ocupa pouco espaço em grandes projetos, porém costuma ser espaçosa em pequenos projetos. Eles apresentam eficiência elétrica entre 34 a 45% e vida útil em torno de 60.000 horas [Willenbrink, 2002].

As microturbinas são pequenas turbinas a gás de alta rotação, baixa temperatura e pressão de combustão. Necessitam de compressor para injetar o gás na mesma pressão que o ar dentro da câmara de combustão. Como sua queima ocorre com excesso de ar, pouco monóxido de carbono e hidrocarboneto sai do escape, resultando em emissões menos nocivas. As microturbinas demandam pouca área utilizada tanto em pequenos quanto em grandes projetos. Apresentam vida útil em torno de 90.000 horas, e costumam apresentar eficiência elétrica na faixa de 30%, o que é compensado pelo bom comportamento a cargas parciais. A turbina tem maior tolerância a teor de enxofre em relação ao motogerador [Willenbrink, 2002].

3.3. Turbina

Turbinas são máquinas térmicas que captam e convertem a energia mecânica e térmica contida em um fluido em trabalho do eixo, gerando energia elétrica e térmica. A turbina em questão (fabricada pela Capstone Turbine Co.) tem seu funcionamento ilustrado na Figura 3.1.

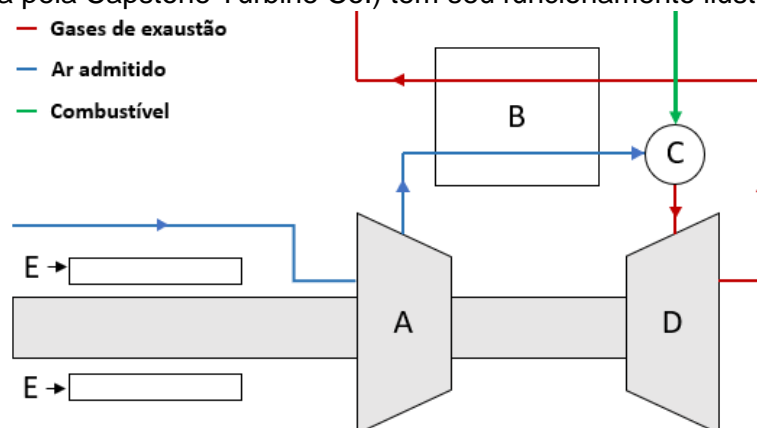


Figura 3.1 Diagrama esquemático da turbina.

O ar que é admitido passa pelo compressor, A, onde tem sua pressão elevada e então entra em um trocador de calor, B, para chegar aquecido na câmara de combustão, C. Neste local, ele se mistura com o combustível, entra em ignição, e então os gases de exaustão são direcionados para a turbina. Os gases exercem trabalho nas pás da turbina, rotacionando-a, aumentando a energia do rotor. Parte dessa energia é utilizada no compressor, parte é convertida

em energia elétrica no estator, E , e parte é perdida. Por este motivo, a variação da quantidade de combustível admitido altera o trabalho na turbina, que, conseqüentemente, altera a eletricidade gerada, resultando nas diferentes eficiências de conversão de energia elétrica com diferentes cargas. Por fim, os gases de exaustão saem do equipamento [Willenbrink, 2002].

3.3.1. Cálculo da energia gerada por uma turbina

Este trabalho foi realizado em cima de modelos de turbinas conhecidos com seus respectivos dados e equacionamento. A potência elétrica P_e , em W, produzida pela turbina obedece a uma curva de eficiência catalogada, que é apresentada no Anexo I, e é dada pela Equação (3.2) [Capstone, 2012b]:

$$P_e = \dot{Q}_c \cdot \eta_e \quad (3.2)$$

onde \dot{Q}_c é a taxa de calor entregue pelo combustível que é admitido em W, η_e é a eficiência de conversão elétrica, que varia em função da taxa de calor entregue pelo combustível, $\eta_e = f(\dot{Q}_c)$. Essa taxa de calor varia com a vazão de combustível, como visto previamente. Calcula-se a energia elétrica gerada E_e em kWh, integrando a potência elétrica no tempo, obtendo-se a Equação (3.3):

$$E_e = \int_0^t \eta_e \cdot \dot{Q}_c \cdot dt = \sum_{t=1}^j \eta_{e_t} \cdot \dot{Q}_{c_t} \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

onde a primeira versão da equação integra ela ao longo do tempo e a segunda a resolve discretamente, sendo o tempo dividido em períodos constante Δt em h, e η_{e_t} e \dot{Q}_{c_t} assumem valores para cada momento.

3.4. Compressores

Compressores são dispositivos mecânicos cuja finalidade é aumentar a pressão de um fluido reduzindo seu volume. Os principais parâmetros para seu dimensionamento são o caudal e a variação de pressão requerida. Cada compressor possui sua curva de desempenho caracterizada como diferença de pressão por vazão, na qual existe um ponto de maior eficiência, que deve ser o ponto de projeto. Compressores modernos podem possuir inversores de frequência que são capazes de fazer com que a velocidade de rotação dele se altere, trasladando a sua curva de desempenho. Dessa maneira o compressor pode trabalhar com maior faixa de pressão e vazão [NEMA, 2008].

O cálculo do consumo de energia do compressor é feito em função do trabalho de compressão que ele executa. Uma das maneiras de se calcular o trabalho de compressão é através do trabalho de compressão isentrópico W_{C_s} . A partir de um estado 1 com propriedades conhecidas, desconsiderando a transferência de calor nas redondezas e efeitos da energia potencial e cinética, e considerando o fluido um gás ideal, pode-se calcular o W_{C_s} em J, através da Equação 3.4 [Moran *et al.*, 2013]:

$$W_{C_s} = \dot{m}(h_{2_s} - h_1) \cdot \Delta t \quad (3.4)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica do fluido em kg/h, h_{2_s} é a entalpia isentrópica no segundo estado em kJ/kg, h_1 é a entalpia no primeiro estado em kJ/kg, e Δt é o tempo em h. Como a entropia é considerada constante neste processo e conhecendo a pressão no segundo estado, é possível

encontrar as propriedades deste segundo estado hipotético. Caso o fluido seja uma mistura, deve-se encontrar as propriedades de cada composto para então calcular as propriedades da mistura. As propriedades de cada composto são calculadas em função da sua pressão parcial, que por sua vez é calculada a partir da sua fração molar ou volumétrica.

O trabalho de compressão isentrópica será menor do que o trabalho de compressão real. Esta diferença pode ser calibrada conhecendo-se a eficiência isentrópica do compressor η_c em %, que cujo cálculo é apresentado na Equação (3.5) [Moran *et al.*, 2013]:

$$\eta_c = \frac{-W_{c_s}}{-W_c} \quad (3.5)$$

onde W_c é o trabalho de compressão real em J. Caso o estado 2 ou a vazão mássica varie, é possível calcular a compressão isentrópica em cada período pela Equação (3.4), fazer o seu somatório, para então aplicar a Equação (3.5).

3.5. Acumuladores

A maioria das aplicações de biogás é acoplada a uma forma de armazenamento, a qual é dimensionada para acomodar uma quantidade de gás e compensar flutuações. Existem vários tipos de acumuladores com esse fim, dentre os que mais se destacam: o armazenamento dentro do próprio reator, o gasômetro de lona impermeável e o vaso de pressão [FNR, 2010].

O armazenamento dentro do próprio reator utiliza do espaço interno dele para comportar o biogás. A biomassa permanece na parte inferior, o biogás gerado se direciona na parte superior, o que acaba formando uma célula de armazenagem do biogás. Os gasômetros de lona impermeável são estruturas de PVC flexível que inflam, se expandindo ou comprimindo de acordo com a quantidade de biogás dentro dela. São aplicados a pressões próximas da pressão ambiente e normalmente requerem uma grande área de ocupação. Os vasos de pressão são equipamentos feitos de aço ou polímeros, que normalmente têm formato cilíndrico ou esférico, o que diminui suas tensões. São projetados para pressões médias, aproximadamente 10 bar, e altas, até 300 bar, sendo assim indicados quando há uma restrição na área para aplicação. Para alcançar essas pressões os vasos de pressão necessitam de compressores, o que encarece sua implementação [Schulz, 2006].

3.6. Viabilidade financeira de projetos

Implementar projetos com expectativa de retorno financeiro depende da sua capacidade de atrair investimentos. Um projeto se torna mais atrativo e diminui os seus riscos ao apresentar uma análise de viabilidade financeira. Para realizar tal estudo é preciso determinar o fluxo de caixa gerado pelo projeto, e em seguida estabelecer critérios técnicos para a análise dele. Segundo Bordeaux, 2012, uma prática comum e confiável é a aplicação do modelo do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR). O VPL pode ser calculado pela Equação (3.6)

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (3.6)$$

onde FC_t é o fluxo de caixa no período t na unidade monetária em que o projeto é avaliado, t é o n ésimo período no tempo em que o dinheiro será investido no projeto, n é o número de períodos, e i é o custo do capital em %. O custo de capital representa uma taxa para referenciar o valor do dinheiro no tempo. Pode ser uma taxa de juros relativa ao financiamento do projeto ou o mínimo de retorno percentual esperado por um investidor em um projeto, por exemplo. Caso o VPL seja positivo, o projeto é viável e pode ser aceito. Se for nulo, o aceite ou não do projeto fica

a critério do investidor. E caso o VPL seja negativo, o projeto é inviável financeiramente e deve ser negado.

A TIR é uma taxa de desconto hipotética que quando aplicada faz com que o VPL do projeto seja igual a zero. A TIR pode ser comparada com o custo de capital ou com a TIR de outros projetos. Logo, a TIR em % é calculada pela Equação (3.7):

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} \quad (3.7)$$

4. METODOLOGIA

Este capítulo descreve o estudo de caso realizado, apresenta uma abordagem conceitual com o intuito de elaborar sistemas para a solução do problema e realizar uma pré-seleção deles a partir do desempenho financeiro, refina a abordagem desses sistemas selecionados e estipula critérios de sucesso e seleção deles.

4.1. Estudo de caso

O caso estudado trata-se da estação de tratamento de efluentes, ETE, de uma maltaria no estado do Rio Grande do Sul. Esta ETE é a unidade responsável pelo descarte da água dentro dos limites vigentes em regulamentação, tendo como subproduto o lodo, gás nitrogênio e biogás. Ela faz isso através de um reator de circulação interna e de um reator de remoção de nitrogênio. A ETE opera 16 horas por dia todos os dias, incluindo os finais de semana, contando apenas com paradas para manutenção dos equipamentos. Há uma área disponível para novas instalações de 4,50 x 4,00 m no local, além de espaços entre equipamentos. A ETE não apresenta processos com demanda térmica considerável.

O reator opera conforme a produção da maltaria, o que altera a quantidade de água tratada e, conseqüentemente, a quantidade de biogás produzido. Medições realizadas no local atestam que o biogás que sai do reator contém 85,9% de metano, o que representa um PCI de 29.106 kJ/m³ [NIST, 2018]. Este biogás é atualmente queimado em tocha de segurança para reduzir dano ambiental. De acordo com a mesma análise, há presença de 600 ppm de H₂S.

Não foi possível obter dados anuais da vazão de biogás, o que permitiria avaliar a sazonalidade da produção. Entretanto, foi obtida a vazão volumétrica horária de biogás ao longo de uma semana com dados coletados na terceira semana de março de 2018. Estes dados foram convertidos para vazão mássica, considerando que o restante do biogás é apenas CO₂, utilizando a massa específica e a fração molar do CH₄ e do CO₂, como segue na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Vazão mássica horária de biogás de uma ETE na terceira semana de março de 2018.

No gráfico é possível observar os períodos de pausa da operação, quando a vazão de biogás fica com valores próximos de zero. Elas raramente terão valor igual a zero, porque são poucos os momentos em que o reator fica sem alguma quantidade de matéria orgânica, produzindo uma quantidade residual de biogás. Além disso, deve-se considerar que a resolução do instrumento de medição é de 1 kg/h. Verifica-se que o tempo de pausa flutua para valores próximos ou menores do que as oito horas. A vazão mássica nos períodos de produção oscila até o valor máximo de 60 kg/h. Ao longo da semana a vazão média foi de 19 kg/h.

4.2. Abordagem conceitual

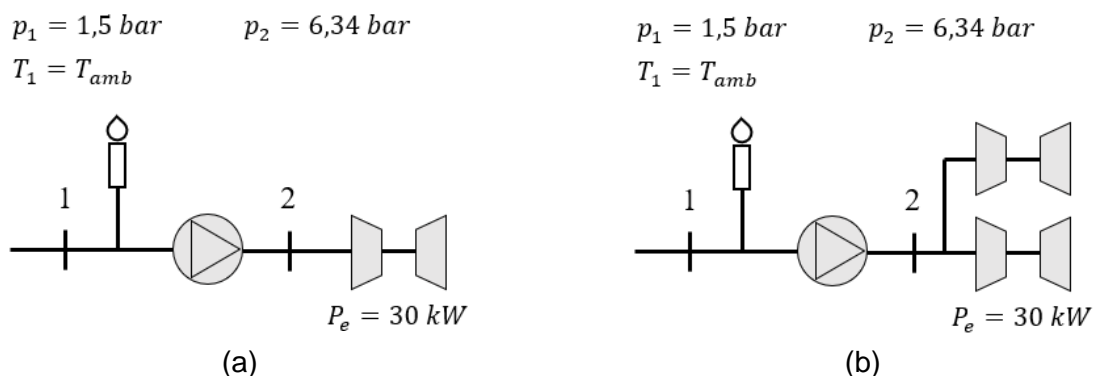
A possibilidade de aproveitamento de energia elétrica a partir do biogás foi abordada na forma de um projeto conceitual, a partir dos dados de vazão. O desempenho das opções permitiu pré-selecionar as estratégias que tivessem melhores resultados, para posteriormente serem analisadas em uma abordagem refinada. Não foi analisada a possibilidade de cogeração, devido a falta de demanda de energia térmica local. Foram estudados apenas sistemas com turbina como máquina térmica de geração de energia elétrica, porque nessa aplicação o equipamento precisa de um bom desempenho com cargas parciais e o biogás apresenta conteúdo de H_2S .

4.2.1. Sistemas propostos

Ao observar catálogos de uma fabricante de turbinas, constatou-se que dois modelos de turbina podem ser aplicados nesse caso, em virtude dos seus respectivos consumos de combustível, no caso o biogás: turbina de 30 e de 65 kW de potência elétrica. A primeira turbina admite biogás suficiente para operar em carga plena, porém há um excesso que é desperdiçado. A segunda é subutilizada em virtude de a vazão média fornecida de biogás ser menor do que a carga plena. A turbina de 30 kW tem menor eficiência elétrica, 26% em carga máxima, do que a de 65 kW, 29%. O consumo das turbinas e as suas eficiências são apresentadas no Anexo I. Além disso, como o reator opera de maneira intermitente e com flutuações, foram arquitetados sistemas que acumulem o excesso de biogás durante a sua operação para utilizar durante as suas pausas. Logo, os sistemas conceituais propostos variam o modelo e quantidade de turbinas, incluindo a possibilidade de acumular o biogás.

4.2.1.1 Sistemas de conexão direta com a turbina

Três sistemas foram configurados alterando o modelo de turbina e a quantidade, conforme apresentado na Figura 4.2.



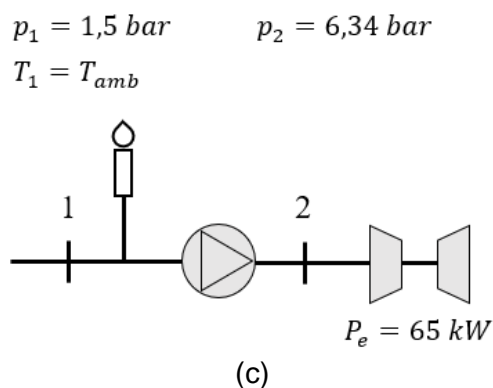
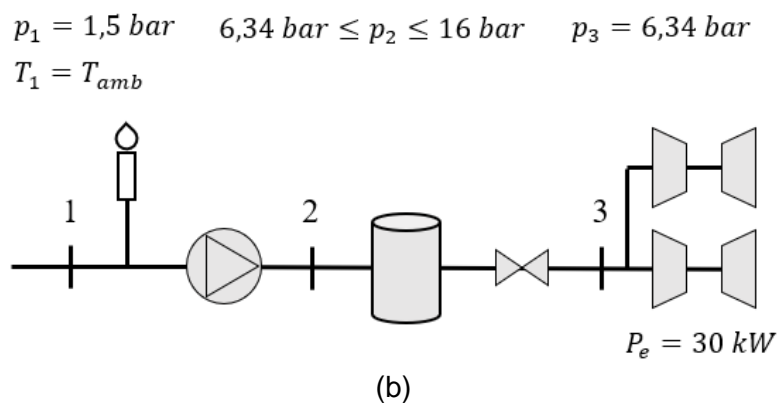
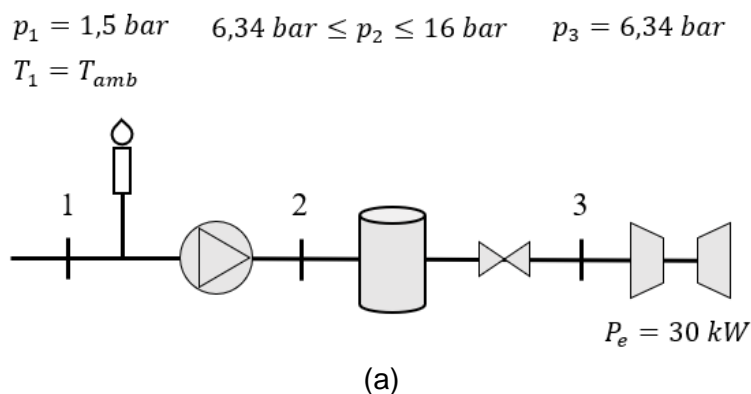


Figura 4.2 - Sistemas com um compressor, uma tocha de segurança e de conexão direta: (a) com uma turbina de 30 kW, (b) com duas turbinas de 30 kW e (c) com uma turbina de 65 kW.

O reator entrega biogás, em 1, cuja pressão é elevada através de um compressor para atingir a pressão de operação da turbina, em 2 [Capstone, 2012a; Capstone 2012b]. Caso a(s) turbina(s) não consuma(m) todo o biogás disponível, o excesso é queimado na tocha de segurança. Em todos os casos a(s) turbina(s) trabalha(m) em algum momento com cargas parciais.

4.2.1.2 Sistemas com acumulação

Três sistemas com acumulação foram configurados alterando o modelo de turbina e a quantidade, conforme apresentado na Figura 4.3.



$$p_1 = 1,5 \text{ bar} \quad 6,34 \text{ bar} \leq p_2 \leq 16 \text{ bar} \quad p_3 = 6,34 \text{ bar}$$

$$T_1 = T_{amb}$$

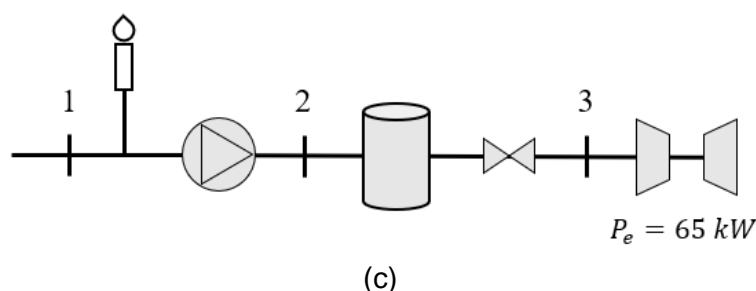


Figura 4.3 - Sistemas com acumulação com um compressor e: (a) com uma turbina de 30 kW, (b) com duas turbinas de 30 kW e (c) com uma turbina de 65 kW.

Nestes casos, o acumulador fica entre a turbina e o compressor. O biogás tem sua pressão elevada no ponto 2 entre a pressão de operação da(s) turbina(s) e a pressão máxima de operação do tanque acumulador, passando por este. Depois, sua pressão é reduzida até a pressão de operação da(s) turbina(s), no ponto 3. Quando a(s) turbina(s) não consome(m) todo biogás disponível, o excesso é acumulado no tanque. Uma vez que o tanque esteja cheio, o biogás é desviado à tocha de segurança. O volume total de biogás produzido é suficiente para operar a turbina a carga máxima ao longo do tempo apenas no sistema com uma turbina 30 kW. Nos outros dois, a(s) turbina(s) serão subutilizadas.

4.2.2. Pré-seleção

Foi realizada uma análise simplificada dos sistemas conceituais com o intuito de pré-selecionar os melhores casos para realizar a abordagem refinada. Para esta análise foram assumidas as seguintes hipóteses técnicas e financeiras:

- O biogás provido pelo reator mantém a sua concentração de metano constante;
- As turbinas possuem eficiência de conversão elétrica máxima para qualquer carga e operam com qualquer carga abaixo do consumo máximo;
- Não é consumida energia pelo processo de compressão;
- As perdas de carga são desprezadas;
- Os acumuladores são infinitos, ou seja, acumulam quanto estiver disponível, e não têm perdas;
- Para orçar os equipamentos foram utilizados produtos com o desempenho próximo do esperado.

Com estas premissas postas, foi calculada a energia produzida por cada sistema através das Equações (3.2) e (3.3), e dos dados da curva de eficiência da turbina presentes no Anexo I. A partir disso foram elaborados fluxos de caixa preliminares, que são detalhados no Apêndice B. Estes foram analisados financeiramente utilizando o VPL como indicador. Foram selecionados os sistemas que apresentaram os maiores resultados de valor presente líquido. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valor presente líquido em R\$ dos sistemas conceituais propostos

Sistema	VPL (R\$)
Direto com um turbina de 30 kW	-198.758,22
Direto com duas turbinas de 30 kW	-384.323,76
Direto com um turbina de 65 kW	-27.505,94
Com acumulação e uma turbina de 30 kW	-173.117,20
Com acumulação e duas turbinas de 30 kW	-321.122,42
Com acumulação e uma turbina de 65 kW	73.994,03

O sistema com acumulação e com uma turbina de 65 kW apresentou o melhor resultado, seguido do sistema apenas com a turbina de 65 kW. O refino na abordagem pode evidenciar fatores que diminuam a atratividade do sistema com acumulação. Devido a isso, ambos sistemas foram selecionados para a análise com maior refinamento técnico.

4.3. Abordagem refinada

Os sistemas pré-selecionados tiveram sua análise aprofundada com premissas mais próximas da realidade com o objetivo de trazer mais confiança no resultado, diminuindo o risco do investimento. Isso inclui levar em consideração as cargas parciais no cálculo de energia, calcular o consumo de energia na compressão e o dimensionamento do acumulador. Os sistemas foram comparados a partir destas novas considerações e, então, foram estabelecidos critérios para a seleção definitiva.

4.3.1. Desenvolvimento

Algumas considerações empregadas nos sistemas na pré-seleção foram alteradas e outras foram adicionadas, para então calcular a sua influência no desempenho deles. Essas são:

- A ineficiência da partida e do desligar da turbina foi desprezada;
- O biogás foi tratado como gás ideal;
- O trabalho de compressão total ao longo do período de análise é equivalente a energia consumida pela compressão;
- A compressão é isentrópica e a eficiência de compressão isentrópica é mantida constante em todos os casos;
- Os acumuladores são dimensionados para contabilização de seu custo, porém para o cálculo de energia eles são considerados infinitos;
- O custo da tarifa energética se mantém ao longo do tempo.

O vaso de pressão para os sistemas com acumulação foi dimensionado em função da vazão do equipamento, do volume de biogás na semana, das pressões que o reator entrega o biogás e que o compressor eleva ele e de um raio máximo de 0,75 m, o qual foi estipulado devido a restrição de área. A partir desse dados, foi obtido um vaso de pressão vertical cilíndrico de tampo esférico de 15,9 m³ e 9,5 m de altura, cujo dimensionamento pode ser conferido no Apêndice A. Como o biogás tem conteúdo de H₂S, o vaso de pressão deve ser de aço inoxidável. Isso eleva o custo de investimento e de manutenção do vaso de pressão.

Levando em conta o impacto do compressor nos sistemas percebe-se que há duas maneiras de se abordar a acumulação: utilizando dois compressores que elevam a pressão do biogás a uma pressão fixa e dispendo o acumulador em uma linha paralela a outra que vai direto na turbina; e a utilização de um compressor que eleva o biogás a uma pressão variável, onde todo o biogás passa pelo acumulador antes de ser direcionado a turbina.

Como resultado disso, existem três sistemas a serem analisados: o de conexão direta, com acumulação em série e com acumulação em paralelo. Eles são apresentados a seguir, junto ao seu cálculo de energia gerada e do consumo de energia pela compressão, o qual foi calculado com apoio do programa EES.

4.3.1.1. Sistema de conexão direta

Esse sistema tem a mesma disposição e os mesmos dados de pressão que foram apresentadas na Figura 4.2 (c). A vazão de biogás que a turbina admite varia conforme a produção. Foi utilizada a Equação (3.3) para o cálculo da energia gerada com os dados de vazão mássica ilustrados na Figura 4.1 e o PCI do biogás para encontrar a taxa de calor entregue para a turbina em cada momento, e a curva de eficiência de conversão da turbina, apresentada no Anexo I. A energia gasta na compressão foi calculada pelas Equações (3.4) e (3.5). Só é comprimido o biogás que for admitido na turbina, seguindo a mesma lógica do cálculo da energia. Considerou-se a temperatura ambiente no estado 1 igual a 15 °C, as pressões no estado 1 e 2 já citadas, e que a eficiência de compressão isentrópica é de 90%.

4.3.1.2. Sistema com acumulação em série

O segundo sistema tem a mesma disposição e dados de pressão apresentados na Figura 4.3 (c). O acumulador estabiliza a vazão de biogás entregue a turbina no valor igual a média da vazão mássica, 19kg/h. Logo, a taxa de calor entregue para a turbina é constante, e será igual a vazão mássica média multiplicado pelo PCI. Nesta quantidade de taxa de calor, a eficiência da turbina é de 27,5%, como pode ser visto no Anexo I. Calcula-se então a energia entregue pela Equação (3.3). Neste caso todo o biogás produzido passa pelo compressor e em seguida pelo vaso de pressão, onde a pressão varia, o que afeta a pressão que o compressor tem que elevar o biogás. Assim, calculou-se a pressão dentro do acumulador de acordo com a quantidade de massa que havia dentro dele, com relação a sua carga máxima, a qual foi calculada pelo volume de autonomia, demonstrado no Apêndice A, e com a massa específica do biogás. A energia de compressão foi calculada pelas Equações (3.4) e (3.5). Considerou-se a temperatura ambiente no estado 1 igual a 15 °C, as pressões no estado 1 já citada bem como a faixa de pressão do estado 2, e que a eficiência de compressão isentrópica é de 70%.

4.3.1.3. Sistema com acumulação em paralelo

O terceiro sistema é composto por dois compressores, um tanque acumulador, a válvula reguladora de pressão, a turbina e a tocha de segurança, como segue na Figura 4.4.

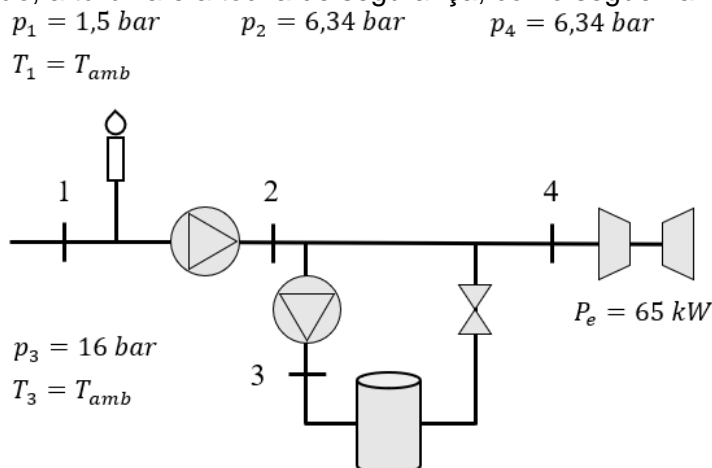


Figura 4.4 - Sistema com acumulação em paralelo com dois compressores, um acumulador, uma válvula reguladora de pressão e uma turbina.

O biogás é elevado a pressão de operação da turbina no ponto 2. Quando a vazão de biogás for menor ou igual ao consumo máximo da turbina, o biogás irá direto para a turbina. Caso a vazão seja maior, a diferença é direcionada para a linha paralela, elevando a sua pressão no ponto 3 e sendo acumulada no tanque. Se a vazão de biogás fornecida pelo reator for menor do que o consumo máximo da turbina, o acumulador passa a entregar a diferença, que terá sua pressão reduzida a pressão de operação da turbina no ponto 3. Sempre que o tanque estiver cheio, parte do biogás fornecido pelo reator é desviado para a tocha de segurança.

Análogo ao caso anterior, neste o acumulador garante uma vazão de biogás estável para a admissão da turbina, por isso foi utilizado o mesmo cálculo para geração de energia elétrica com os mesmos parâmetros. O cálculo da energia consumida na compressão se divide entre os dois compressores. O primeiro é calculado com os mesmos parâmetros que o sistema de conexão direta, tendo como única diferença o fato que neste caso todo o biogás tem sua pressão elevada devido a presença do acumulador. No segundo compressor apenas o excesso de biogás terá sua pressão elevada, sendo os valores dessas pressões ilustradas na Figura 4.4. Esse excesso de biogás foi calculado a partir da diferença entre a vazão horária produzida e a vazão que alimentará a turbina, que neste caso foi estipulada em 19 kg/h pelo mesmo critério do sistema em série. As eficiências isentrópicas de ambos compressores é 90%.

4.3.2. Análise financeira dos sistemas

Como a objetivo do estudo é a viabilidade financeira, o foco da análise também possui esse viés. Foi desenvolvido um fluxo de caixa dos três sistemas. O período de análise considerado foi de 10 anos, mesmo tempo de vida útil da turbina [Capstone, 2012b] e o custo de capital foi de 15%. Como a turbina e os compressores são importados e fazem parte do investimento inicial do projeto, foi utilizada a cotação do dólar do dia 01 de junho de 2018, de R\$ 3,767. A receita do projeto é o valor da energia líquida gerada multiplicada pelo valor da tarifa cobrada de R\$0,423/kWh. O desenvolvimento do centro de custos e do fluxo de caixa pode ser observada em detalhes no Apêndice C. Os fluxos de caixa foram analisados pelos indicadores de valor presente líquido, VPL, calculado pela Equação (3.6), e a taxa interna de retorno, TIR, calculada pela Equação (3.7). O sistema que apresentar VPL positivo e que alcançar a maior TIR deve ser selecionado. Caso nenhum tenha VPL positivo, o investimento não deve ser feito.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados três sistemas de projeto de geração de energia elétrica a partir do biogás fornecido pelo reator, que alimentam uma turbina a gás de 65kW para produção de eletricidade, sem utilização dos rejeitos térmicos, sendo eles: sistema de conexão direta, sistema com acumulação em série e sistema com acumulação em paralelo. Os dois sistemas com armazenamento possuem o mesmo acumulador. Os resultados de energia gerada, energia consumida pelo compressor e energia líquida gerada, são demonstrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Energia gerada, energia consumida pelo compressor e energia líquida gerada dos três sistemas.

	Conexão direta	Acumulação em série	Acumulação em paralelo
Energia gerada por semana – kWh/semana	5.893,92	7.947,34	7.947,34
Energia consumida pelo compressor por semana – kWh/semana	182,6	424,3	334,11
Energia líquida gerada por semana – kWh/semana	5.711,32	7.523,04	7.613,23

Os sistemas com acumulação geram mais energia por semana, por conseguirem trabalhar com uma quantidade maior de biogás. O de acumulação em série apresenta maior gasto de energia com compressão. O sistema de conexão direta é o que comprime a menor pressão, o que justifica o seu menor gasto energético com compressão. Dentre estes, o sistema que gera a maior energia líquida é o de acumulação em paralelo, por apresentar menor consumo de energia com a compressão. Os resultados financeiros dos indicadores apresentados para os três sistemas de projeto em um período de 10 anos podem ser observados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Valor presente líquido dos sistemas com turbina direto, com acumulação em série e com acumulação em paralelo.

	Conexão direta	Acumulação em série	Acumulação em paralelo
Valor Presente Líquido	-R\$150.929,75	-R\$156.494,62	-R\$237.698,22
Taxa Interna de Retorno	9,56%	10,63%	8,62%

Nenhum sistema modelado para a situação apresentou VPL positivo o que indica que o investimento nos projetos deve ser negado. O sistema de conexão direta é a que apresentou o maior VPL, devido ao seu menor investimento e menor custo operacional, apesar de ter menor receita devido ao seu baixo valor de energia elétrica líquida gerada. O sistema com acumulação em série apresentou maior TIR. O sistema de acumulação em paralelo apresentou menor VPL e TIR. Apesar de ter mais energia elétrica líquida gerada e, conseqüentemente, mais receita, seu maior investimento e custo operacional acabam pesando mais.

Entretanto, a hipótese conservadora de manutenção da tarifa de energia ao longo do tempo de projeto, a recente alta do dólar e algumas limitações técnicas do caso estudado, podem ter impactado a viabilidade do projeto. Por isso, é válido conjecturar o que tornaria os sistemas viáveis financeiramente para projetos em uma situação semelhante, considerando fatores econômico-financeiros e técnicos.

5.1. Impacto de fatores econômico-financeiros no projeto

Do ponto de vista econômico-financeiro as variáveis são os preços dos equipamentos, a cotação do dólar, o preço da energia elétrica e o custo de capital. Embora seja possível um cenário onde os equipamentos sejam de fornecedores mais baratos, o que reduziria o investimento inicial, ou de fornecedores locais, o que evita a operação em outra moeda, restringiu-se a análise para as variáveis com maiores oscilações, ou seja, a cotação do dólar e o preço da energia elétrica.

Observou-se que o VPL do sistema de conexão direta a se torna positivo a partir de uma cotação do dólar igual ou menor que R\$ 2,897. Embora este valor seja menor que os atuais R\$ 3,767, a cotação já foi menor que os R\$ 2,897 durante o período entre setembro de 2004 e março de 2015, data a partir da qual ela se manteve acima de R\$ 3,00 [Portal Brasil, 2018].

Quanto a tarifa de energia elétrica, observou-se que, caso a tarifa ao longo do tempo de projeto seja em média 28,17% maior do que o preço atual, o VPL do sistema de conexão direta se torna positivo. Essa variação é menor do que o aumento de 33,54% do preço da tarifa em 2017 na CEEE.

Se o dólar voltasse para R\$ 3,200, valor próximo ao que foi praticado ao longo de todo o ano de 2017 e nos dois primeiros meses de 2018, o VPL passaria a ser positivo com um aumento da tarifa de energia elétrica em 9,79% em relação ao valor praticado na data deste trabalho.

5.2. Impacto de fatores técnicos no projeto

Analisando do ponto de vista técnico, podemos levar outros fatores em conta, que passam despercebidos na análise financeira. Apesar de não ter sido explorada nesse estudo, a utilização

da energia da turbina poderia aumentar a receita do projeto, bastando que houvesse demanda térmica significativa.

Além disso, poderia-se desconsiderar o uso do acumulador em casos onde há volume de biogás semanal com valores similares deste caso, porém sem interrupções e flutuações na vazão. Isso implica em menor necessidade de compressão, logo um compressor menor, o que diminui tanto o consumo de energia pelo compressor quanto o investimento inicial, resultando em um VPL maior. Outra possibilidade seria a implementação do projeto em um local com maior área disponível para o acumulador. Nesse caso seria possível utilizar um vaso de pressão com maior volume, diminuindo a pressão a qual o biogás será elevado. O investimento no vaso de pressão seria maior e o custo de manutenção se mantém, porém, se utilizaria menos energia para a compressão e o compressor poderia ser menor. Em locais com áreas disponíveis ainda maiores, pode-se utilizar um gasômetro de membrana dupla de PVC ao invés de vaso de pressão. Esta membrana é flexível, fazendo com que o gasômetro funcione como um balão. Nela opera-se com menores pressões, sendo possível utilizar um compressor que trabalhe em baixa sobre pressão com relação a pressão de operação da turbina.

6. CONCLUSÕES

No presente estudo foram desenvolvidos sete sistemas de produção de energia elétrica a partir do biogás. Dentre eles, três passaram por refinamento técnico e, posteriormente, uma análise de viabilidade financeira mais detalhada. Observou-se o impacto causado por alterações em fatores econômico-financeiros e técnicos. Valores de produção de biogás dentro de uma semana de uma estação de tratamento de efluentes no Rio Grande do Sul foram utilizados como dado de entrada para os sistemas propostos a modelagem dos sistemas.

Nenhum sistema teve viabilidade financeira, tomando como critério o valor presente líquido. O sistema em que há apenas um compressor e uma turbina de 65 kW obteve o maior VPL. Dos sistemas que incluem a possibilidade de armazenamento do biogás, aquele com o acúmulo em série apresentou maior VPL, apesar de o sistema com acúmulo em paralelo produzir mais energia elétrica líquida.

Verificou-se que, caso o projeto fosse realizado em outro contexto econômico, as soluções apresentadas poderiam se tornar mais atrativas. Haveria viabilidade financeira tanto em um cenário onde o dólar apresentasse cotações similares às que foram realizadas nas últimas décadas, quanto se a da tarifa de energia elétrica sofresse um aumento na mesma proporção da verificada em 2017. Também foi ponderado o impacto de fatores técnicos, como: a existência de demanda térmica, que poderia ser suprida com cogeração da turbina; a maior disponibilidade de área, que tornaria a acumulação mais barata; a inexistência de pausas e menores flutuações.

Sugere-se para trabalhos futuros uma análise que considere a sazonalidade na produção de biogás no ano e a execução de um estudo semelhante, porém considerando o uso de motores para comparar o seu desempenho com os sistemas que utilizam turbina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bordeaux, R *et al.*; **“Viabilidade Econômico-Financeira de Projetos”**; FGV, 3ª edição, 2012.

Braun, R; **“Biogas - Methangärung organischer Abfallstoffe”**; Springer Verlag Viena; 1982.

Briggs, D; **“Malts and Malting”**; Springer, 1998.

Capstone; **“Capstone MicroTurbine® Model C30 Performance”**; 2012

Capstone; **“Capstone MicroTurbine® Model C65 Performance”**; 2012.

CEEE; **“Tabela de Tarifas – Grupo A”**;
http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Tarifas_A-2017-12_85226.pdf. Acessado em junho de 2018.

FNR; “**Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**”; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., 5ª edição, 2010.

Habets, L; “**Introduction of the Internal Circulation Reactor in the Paper Industry**”; <https://pdfs.semanticscholar.org/e654/dbbb15f3ed25df2da583050bb1599cccecc3.pdf>. Acessado em junho de 2018.

KIRIN; “**Global Beer Production by Country in 2013**”; https://www.kirinholdings.co.jp/english/news/2014/0808_01.html; Kirin Beer University, 2014.

Metcalf, L.; Edy, Harrison P.; “**Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.**”; McGraw-Hill, New York, 5nd edition, 2015.

Moran, M *et al.*; “**Fundamentals of Engineering Thermodynamics**”; editora John Willey & Sons, Inc., 7ª edição, 2013.

NEMA Standards Publication; “**Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems**”; National Electrical Manufacturers, 2008.

NIST; “**NIST Chemistry WebBook**”; <https://webbook.nist.gov>. Acessado em julho de 2018.

Portal Brasil; “**Cotações diárias do Dólar, Euro e do ‘Risco Brasil’**”; http://www.portalbrasil.net/indices_dolar.htm. Acessado em junho de 2018.

Schulz, H.; Eder, B.; “**Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiel**”; Editora Ökobuch, 2ª edição, 2006.

Willenbrink, B.; “**Einsatz von Micro-Gasturbinen zur Biogasnutzung, Erneuerbare Energien in der Land(wirt)schaft**”; Verlag für land(wirt)schaftliche Publikationen – volume 5, 1ª edição de dezembro de 2002.

ANEXO I – Curva de eficiência das turbinas

Os dados de eficiência de conversão elétrica da turbina de 65 kW pela potência do combustível entregue de acordo com o fabricante, [Capstone, 2012b], foram transformados em uma curva, apresentada na Figura I:

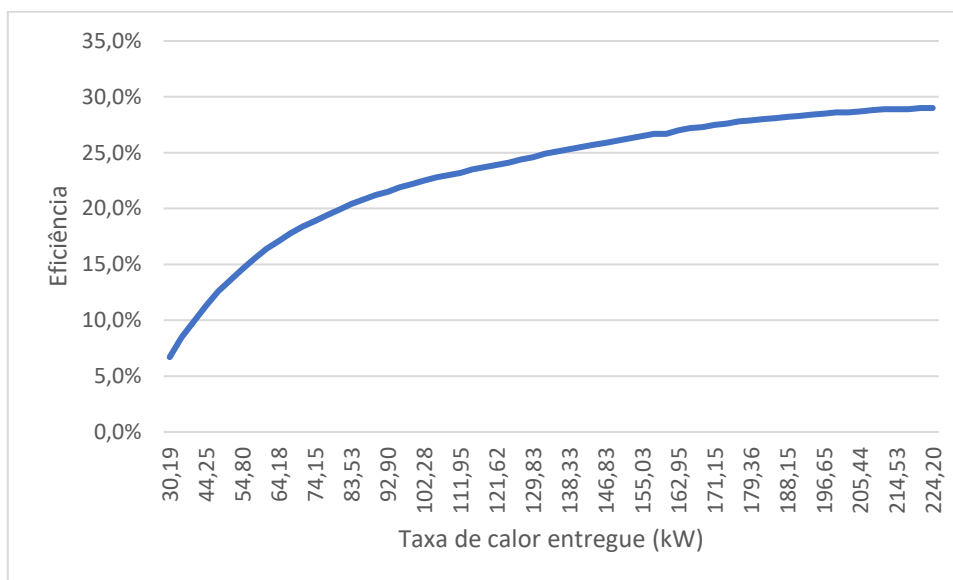


Figura I – Curva de eficiência da turbina 65 kW pela taxa de calor entregue pelo combustível.

observa-se que a turbina chega até uma eficiência máxima de 29% de conversão em energia elétrica, admitindo combustível desde 30,19 kW até 224,2 kW, o que em termos do biogás deste caso representa uma admissão de no mínimo 3,33 kg/h até 24,73 kg/h.

Os dados de eficiência de conversão elétrica da turbina de 30 kW pela potência do combustível entregue de acordo com o fabricante, [Capstone, 2012a], foram transformados em uma segunda curva, apresentada na Figura II:

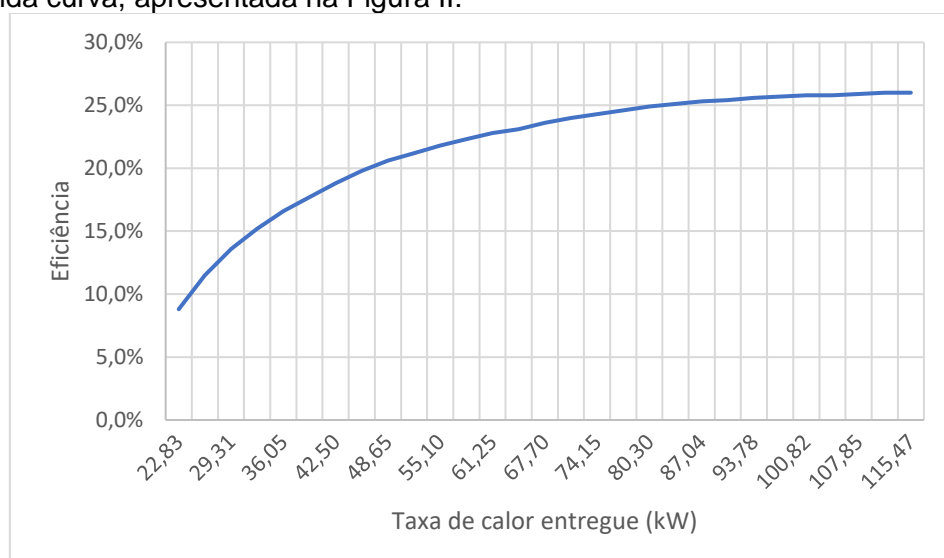


Figura II - Curva de eficiência da turbina 30 kW pela taxa de calor entregue pelo combustível.

observa-se que a turbina chega até uma eficiência máxima de 26% de conversão em energia elétrica, admitindo combustível desde 22,83 kW até 115,47 kW, o que em termos do biogás deste caso representa uma admissão de no mínimo 2,82 kg/h até 14,28 kg/h.

APÊNDICE A - Dimensionamento de acumuladores de gás

O objetivo da instalação de um acumulador é compensar flutuações e intermitências de fornecimento para outro equipamento. Logo, o projeto do acumulador é desenvolvido para a sua situação mais crítica, que é a maior quantidade de tempo que for necessário o seu fornecimento. Este será o tempo de autonomia do acumulador, t_{auto} , que no presente estudo é igual a 8 horas.

Antes de calcular o volume de gás que o acumulador deve armazenar, deve-se conferir se há disponibilidade para a situação mais crítica. Calcula-se o volume de gás necessário pelo equipamento durante o período em que não é utilizado o acumulador V_{eq} . Em uma situação com pausas diárias, o cálculo de V_{eq} é definido como:

$$V_{eq} = \dot{V}_{eq} \cdot (24 - t_{auto})$$

onde \dot{V}_{eq} é a vazão a carga plena pelo equipamento. O V_{eq} encontrado foi de 443,2 m³. Calcula-se o volume disponível em um dia para acumulação V_{disp} , como na seguinte equação:

$$V_{disp} = \bar{V}_e - V_{eq}$$

sendo \bar{V}_e o volume médio diário que entra no acumulador, que é igual 510, 1 m³. A partir desse cálculo chegou-se à um V_{disp} de 66,9 m³. Conhecendo o volume disponível, compara-o com volume de autonomia do acumulador V_{auto} , que é definido por:

$$V_{auto} = \dot{V}_{eq} \cdot t_{auto}$$

O V_{auto} nesta situação é de 221,6 m³. Se o V_{disp} fosse maior que V_{auto} , este volume de autonomia seria utilizado para o volume que o acumulador armazena o gás, nas condições de referência. Porém, como isso não ocorreu, deve-se descobrir a vazão do equipamento onde o volume disponível é igual ao volume de autonomia, como segue:

$$V_{disp} = V_{auto}$$

$$\bar{V}_e - V_{eq} = \bar{V}_e - \dot{V}_{eq} \cdot (24 - t_{auto}) = \dot{V}_{eq} \cdot t_{auto}$$

$$\dot{V}_{eq} = \frac{\bar{V}_e}{24}$$

A nova \dot{V}_{eq} foi de 21,3 m³. Com este valor, o acumulador conseguirá ter a autonomia prevista. Tendo o volume de gás para o acumulador definido, nas condições de referência, calcula-se o seu volume na pressão na qual o gás será comprimido. Considerando-o um gás ideal, com compressão isotérmica e tendo o número de mols constante, encontra-se o volume do tanque de acumulação V_t , definido por:

$$V_t = \frac{p_e \cdot V_{auto}}{p_c}$$

onde p_e é a pressão de que o gás é entregue antes do compressor, 1,5 bar, e p_c a pressão que o compressor irá comprime o gás, 16 bar. O V_t encontrado foi de 15,9 m³. O formato selecionado foi o cilíndrico com tampas esféricas, como segue na Figura A.1.

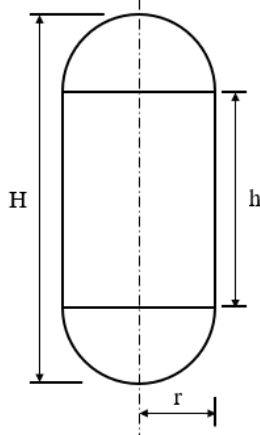


Figura A.1 – Dimensões características de um vaso de pressão

onde r é o raio do tanque, em m, h a altura do cilindro e H a altura total do tanque. H e r são dimensões características de tanque, e devem ser especificadas para a fabricação dele. Através da fórmula do volume do cilindro e da esfera, calcula-se a H em função de r e de V_t , da seguinte maneira:

$$H = \frac{V_t}{\pi r^2} + \frac{2r}{3}$$

O r selecionado foi 0,75 m, devido à restrição de espaço, chegando em um H de 9,52 m.

APÊNDICE B – Centro de custos e estrutura do fluxo de caixa preliminar dos sistemas

O fluxo de caixa dos projetos referentes aos seis sistemas foi estruturado a partir de um centro de custos. O tempo de projeto é de 10 anos, mesmo tempo de vida da turbina e o custo de capital é 15%. Neste centro de custos foi considerado que os sistemas não aumentam a demanda de trabalho dos funcionários do local, logo, não há custo referente à salários. Essa hipótese é razoável, uma vez que é possível automatizar o funcionamento do sistema e que a única mão de obra necessária para ele seria a própria manutenção, a qual já está incluída. Os valores da microturbina e dos compressores foram consultados a partir de dados de tabela dos fornecedores. No caso do acumulador, foi arbitrado um valor representativo dele e da sua manutenção. Os outros preços foram referentes aos históricos da empresa onde o trabalho foi realizado, de razão social Luming Negócios Inteligentes S/A. Assim, foi desenvolvido o seguinte centro de custos dos sistemas apresentado na Tabela B.1:

Tabela B.2 – Centro de custos preliminar dos sistemas

	Custo (R\$)
Turbina C30 – modelo 30R BG4 BU00	224.220,00
Turbina C65 – modelo 65R BG4 BU00	336.330,00
Compressor C30	74.740,00
Compressor C65	112.110,00
Compressor para acumulação	224.220,00
Tanque acumulador	10.000,00
FPP - C30 HP G GC 8C	168.165,00
FPP - C65 HP G GC 8C	168.165,00
Manutenção Compressor C30 e C65	7.474,00
Manutenção Compressor para acumulação	9.342,50
Manutenção Acumulador	1.500,00
Custos de implementação	30.000,00

Nesta análise, tanto o tempo de vida do acumulador quanto dos compressores foi considerado dos mesmos 10 anos que a turbina, fazendo com que eles não tenham valor de venda ao final do projeto. Todos os fluxos de caixa incluem no investimento inicial os preços da turbina, o plano de proteção de fábrica da respectiva turbina (do inglês Factory Protection Plan, FPP), o qual varia conforme o número de turbinas, e os custos de implementação.

Como a receita do projeto é o valor da energia líquida gerada multiplicada pelo valor da tarifa cobrada, a tarifa elétrica foi calculada pela Equação (B.1):

$$\text{Valor da tarifa cobrada} = \frac{\text{Valor da tarifa sem impostos}}{1 - (\text{PIS} + \text{COFINS} + \text{ICMS})} \quad (\text{B.1})$$

O valor da tarifa sem impostos é a tarifa média da concessionária de energia elétrica CEEE vigente no dia 01 de junho de 2018 descontando a parte da tarifa referente a demanda, de R\$ 0,333/kWh, o PIS é 0,59%, o COFINS 2,73%, e o ICMS de energia elétrica às indústrias de 18% [CEEE, 2017], foi obtido o R\$0,423/kWh de valor de tarifa cobrada.

APÊNDICE C – Centro de custos e estrutura do fluxo de caixa final dos sistemas

O fluxo de caixa dos projetos referentes aos três sistemas foi estruturado a partir de um centro de custos de maneira análoga ao Apêndice B. Neste caso, não foi possível receber um orçamento referente ao acumulador, porém, fornecedores consultados passaram uma margem de preço dele, bem como da sua manutenção. O valor da tarifa foi mantido do centro de custos preliminar. Assim, foi desenvolvido o seguinte centro de custos dos sistemas apresentado na Tabela C.1:

Tabela C.1 – Centro de custos final dos sistemas

	Custo (R\$)
Turbina C65 - modelo 65R BG4 BU00	362.385,40
Compressor 2 NK	106.417,75
Compressor 3 NK – com inversor	194.000,50
Compressor 3 NK	250.505,50
Tanque acumulador	50.000,00
FPP – C65 HP G GC 8C	186.214,11
Manutenção Compressor 2 NK	9.044,57
Manutenção Compressor 3 NK	11.078,75
Manutenção Acumulador	2.750,00
Transformador	4.000,00
Projeto Elétrico	3.500,00
Instalação mecânica e elétrica	20.000,00
Obra Civil	10.000,00

Nesta análise os compressores têm tempo de vida de 15 anos, segundo datasheet do fornecedor. O que significa que ao término do projeto eles terão um preço de venda de um terço do seu preço de compra original. Todos os fluxos de caixa incluem no investimento inicial os preços da turbina, o plano de proteção de fábrica da respectiva turbina, do transformador, do projeto elétrico, da instalação mecânica e elétrica e da obra civil. Além disso, cada sistema tem outros investimentos iniciais e custos operacionais característicos. São eles:

- Sistema com turbina direto: investimento inicial no compressor modelo 2 NK;
- Sistema com acumulador em série: investimento inicial no compressor modelo 3 NK e no acumulador, e custos operacionais da manutenção do compressor e do acumulador;
- Sistema com acumulador em paralelo: investimento inicial nos compressores modelo 2 NK e 3 NK e no acumulador, e custos operacionais na manutenção dos dois compressores e do acumulador.