

Viabilidade técnica e econômica no tratamento anaeróbico de efluente gerado em indústria de laticínio: um estudo de caso

Technical and economic feasibility in the anaerobic treatment of effluent generated in the dairy industry: a case study

• **Data de entrada:**
02/07/2021
• **Data de aprovação:**
15/05/2023

Lucio Vinícius Aragão Santos^{1*} | Daniel Moreira Fontes Lima¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.023>

ORCID ID

Santos LVAS  <https://orcid.org/0000-0002-6487-1134>

Lima DMF  <https://orcid.org/0000-0002-6155-8564>

Resumo

Em Sergipe, especificamente no Sertão do São Francisco, estão concentrados os maiores polos leiteiros do estado, sendo o município de Nossa Senhora da Glória o maior produtor sergipano. A produção de laticínios geralmente é composta por uma série de etapas que requerem uma significativa demanda energética. Uma forma de reduzir os custos energéticos, e ainda contribuir de forma benéfica para o meio ambiente, é o aproveitamento do biogás gerado a partir do tratamento de resíduos em sistemas anaeróbios. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a possibilidade de produção e utilização do biogás na planta industrial de um produtor laticínio da região, a partir da digestão anaeróbia de seus resíduos. Para isso, foi realizada a caracterização da vazão e dos parâmetros físico-químicos do efluente gerado pela indústria e, em seguida, foram estimados a produção de biogás e o potencial energético do laticínio, a partir do software Probio 1.0. Além disso, elaborou-se um projeto para o tratamento do efluente, incluindo os itens necessários à utilização do biogás na geração de energia elétrica. Os resultados mostraram que a vazão média diária foi 6.833,4 litros de efluentes. Já em termos qualitativos, o efluente bruto apresentou elevada biodegradabilidade. Assim, foi estimado um volume de biogás de 36,2 m³.dia⁻¹ em condições ótimas do sistema, além de um potencial energético de 316,8 kWh.dia⁻¹. O conjunto gerador foi dimensionado para trabalhar de 3 a 4 horas por dia, garantindo uma produção anual de 31.932 kWh e, conseqüentemente, uma economia de R\$ 22.317,12/ano. Os custos anuais encontrados para o cálculo de viabilidade econômica foram de R\$ 142.190,25 e R\$ 6.619,11 para o *capital expenditure* (CAPEX) e o *operational expenditure* (OPEX), respectivamente. Já o valor presente líquido (VPL) foi de R\$ 6.993,87, com um *payback* descontado de 9,53 anos. A taxa interna de retorno (TIR) foi 6,13%, maior que a taxa mínima de atratividade (TMA). Logo, o sistema de geração de energia a biogás do produtor laticínio é uma alternativa atrativa, além de proporcionar ganho ambiental com o tratamento de efluentes e a redução da emissão de gases do efeito estufa.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Biogás. Processos biológicos. Inovação.

¹ Universidade Federal de Sergipe – São Cristóvão – Sergipe – Brasil.

* **Autor correspondente:** aragaolucio@gmail.com.

Abstract

In Sergipe, more specifically in the São Francisco hinterland region, are concentrated the largest dairy centers in the state, with the municipality of Nossa Senhora da Glória being the state's largest producer. The production of dairy products generally comprises a series of steps that require a significant energy demand. One of the ways to reduce energy costs and also contribute beneficially to the environment is the use of biogas generated from the treatment of these wastes in anaerobic systems. Therefore, the objective of this research was to evaluate the possibility of production and use of biogas in the industrial plant of a dairy producer in the region, from the anaerobic digestion of its residues. To this end, the characterization of the flow and the physicochemical parameters of the effluent generated by the industry under study was carried out and, then, the biogas production and energy potential of the dairy were estimated, using the Probio 1.0 software. Also, a project for the treatment of effluent from the dairy was elaborated, including the items necessary for the use of biogas to generate electricity. The results showed that the mean daily flow was 6,833.4 liters of effluents. In qualitative terms, the raw effluent showed high biodegradability. Therefore, a biogas volume of $36.2 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ was estimated under the optimum conditions of the system, in addition to an energy potential of $316.8 \text{ kWh day}^{-1}$. The generator set was dimensioned to work for 3 to 4 hours a day, guaranteeing an annual production of 31,932 kWh and, consequently, savings of R\$ 22,317.12/year. The annual costs found to calculate economic feasibility were R\$ 142,190.25 and R\$ 6,619.11 for capital expenditure (CAPEX) and operational expenditure (OPEX), respectively. The net present value (NPV) was R\$ 6,993.87 with a discounted payback of 9.53 years. The internal rate of return (IRR) was 6.13%, higher than the minimum attractiveness rate (MAR). Thus, the dairy producer biogas energy generation system is an attractive alternative, in addition to providing environmental gains with the treatment of effluents and the reduction of greenhouse gas emissions.

Keywords: Sustainability. Biogas. Biological processes. Innovation.

1 INTRODUÇÃO

A poluição e a contaminação resultantes das atividades humanas, com produção de efluentes domésticos e industriais, resíduos sólidos e supressão de vegetação, influenciam também na qualidade de vida da população. Logo, o reflexo no meio ambiente para o lançamento de esgotos industriais em corpos hídricos, sem quaisquer critérios técnicos de tratamento, pode provocar alterações significativas nas características da água, além de desequilíbrios no ecossistema.

Entre os tipos de indústrias, as de laticínios correspondem a uma grande parcela da área alimentícia. Essas agroindústrias têm um papel fundamental, tanto no ponto de vista econômico quanto no social. Vale destacar que 12% da água potável do mundo é direcionada ao beneficiamento dos produtos do setor lácteo (Wang; Serventi, 2019).

Anualmente, são liberadas mundialmente no meio ambiente entre 4 e 11 milhões de toneladas de resíduos industriais não tratados provenientes de derivados lácteos, representando uma ameaça real à biodiversidade. Todo esse montante gerado é responsável por produzir águas residuais com elevados níveis de carga orgânica e dessa forma se caracteriza o principal impacto do setor ao meio ambiente (Ahmad *et al.*, 2019).

Atualmente, existe uma preocupação notória e crescente quanto à redução do despejo de resíduos industriais no ambiente. Porém, muitas empresas ignoram os possíveis riscos e acabam dando o tratamento inadequado a eles, lançando-os principalmente em corpos hídricos adjacentes (Ahmad *et al.*, 2019; Henares, 2015).

Diante desse cenário, o tratamento anaeróbico se apresenta como uma solução eficiente e adaptada

às necessidades apresentadas, principalmente por suas características e vantagens. O sistema Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) apresenta requisitos importantes e eficazes para tratar diversos tipos de resíduos orgânicos de acordo com a literatura, incluindo aqueles que apresentam elevados teores de carga orgânica, como é o caso do setor lácteo (Tabatabaei *et al.*, 2010).

Além disso, os processos anaeróbios trazem consigo não somente a redução da carga orgânica dos efluentes brutos, mas também a produção de biogás (desde que sejam disponibilizadas condições propícias para sua implantação e operação). Portanto, devido às diversas demandas do mundo contemporâneo por energia renovável, essa pode ser a principal contribuição deste trabalho para o desenvolvimento sustentável (Boldrin *et al.*, 2016).

O aproveitamento do biogás pode representar reduções nas emissões de gases de efeito estufa e controle das mudanças climáticas, além de ser uma opção viável devido ao seu alto poder energético, uma das suas principais vantagens (Brasil, 2015; Lobato, 2011). De acordo com Lima e Passamani (2012), o biogás pode ser recuperado para diferentes aplicações, como geração de eletricidade para uso local ou venda para rede da concessionária de energia.

Porém, apesar de muitas empresas terem ciência da necessidade e buscarem implementar projetos cada vez mais sustentáveis, ainda é notório a sua preocupação quanto aos riscos técnicos e principalmente econômicos, mesmo sabendo que o potencial econômico do biogás está diretamente ligado com o seu potencial de reaproveitamento que pode gerar créditos de carbono e ser negociado no mercado mundial, tornando-se uma forma atrativa para uso dessa técnica alternativa (Duarte, 2006 *apud* Girardi, 2015; Steffens, 2016).

Assim, este trabalho buscou avaliar a possibilidade e viabilidade técnica e econômica para implantação e utilização de um sistema de

geração de biogás na planta industrial de um produtor laticínio, a partir do seu potencial de geração proveniente do tratamento anaeróbio do efluente produzido pela indústria. O intuito é reduzir significativamente tanto os gastos com energia elétrica quanto as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera, e conseqüentemente buscar auxiliar no controle das crises climáticas que assolam cada vez mais o planeta.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da área de estudo

O laticínio, como pode ser visualizado na Figura 1, situa-se no Povoado Lagoa do Rancho, s/n, zona rural do município de Nossa Senhora da Glória, Sergipe. O empreendimento possui uma área total de 7.000 m² com área útil de 478,9 m², que por sua vez está distribuída entre pequenas áreas reservadas à caldeira, cozinha, refeitório e sanitários masculino/feminino, além dos vestiários. Existem ainda as áreas correspondentes à administração e ao almoxarifado de matérias-primas e os locais designados ao recebimento, testes de qualidade e armazenamento do leite.

O acesso à empresa pode ser feito a partir do município de Nossa Senhora da Glória através da rodovia Juscelino Kubitschek, em um percurso de aproximadamente 10 km. O laticínio está localizado entre as coordenadas geográficas de latitude 10°11'5,86" (S) e de longitude 37°29'7,23" (W), zona 24 L, datum SIRGAS2000.

O local tem um clima megatérmico semiárido com temperatura média anual de 24,2 °C, apresentando período chuvoso do mês de março a agosto e se obtendo uma média pluviométrica de 702,4 mm. Já o solo tem caráter argilo-arenoso e franco-argiloso, ou seja, do tipo massapê. Além disso, a vegetação predominante é a caatinga e seu regime de bacias hidrográficas compreende o rio Sergipe e riachos sazonais, além da Bacia do Rio São Francisco.



Figura 1 – Localização do Laticínio.

2.2 Período de monitoramento e análises físico-químicas

A caracterização quantitativa do efluente foi realizada *in loco* a partir de um recipiente com volume fixo de cinco litros, em que foi contabilizado o tempo necessário para o preenchimento deste até sua capacidade máxima ao longo do turno de maior pico operacional da fábrica, visando à obtenção de dados representativos para o projeto.

As coletas ocorreram às 13 horas (medição 1), às 14 horas (medição 2) e às 15 horas (medição 3). Dessa maneira, foram coletados dados três vezes ao dia, durante duas semanas. A partir disso foram obtidas as médias harmônicas das três medições, alcançando-se o tempo médio diário. Por fim, utilizou-se a média harmônica novamente e se obteve o tempo médio total, que foi dividido pelo

volume (5 litros) e, então, resultou na vazão média do laticínio.

Já a caracterização qualitativa do substrato afluente foi realizada no laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) e no Laboratório de Estudos Ambientais (LEA) do Instituto de Tecnologia e Pesquisa (ITP). Os parâmetros analisados encontram-se na Tabela 1 e seguiram metodologias determinadas pelo *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (American Public Health Association, 2012).

Foram realizadas três visitas técnicas para a coleta de amostras, que ocorreram em intervalos de 21 dias e a partir de uma única saída do efluente industrial bruto da indústria, ambas no turno vespertino por ser o período de maior produção.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados, seus respectivos métodos e análises e referências.

Parâmetros	Unidade	Método de Análise	Protocolo APHA (2012)
DBO	mg.L ⁻¹	Incubação 5d a 20°C	SM 5210 B
DQO	mg.L ⁻¹	Espectrofotométrico	SM 5220 D
Sólidos suspensos Fixos	mg.L ⁻¹	Gravimétrico	MEN-LEA-015
Sólidos suspensos Voláteis	mg.L ⁻¹	Gravimétrico	SM 2540 BCDE
Sólidos totais Dissolvidos	mg.L ⁻¹	Gravimétrico	2540 B/C
Nitrito	mg.L ⁻¹	Espectrofotometria	SM 4500 NO2 B
Nitrato	mg.L ⁻¹	Espectrofotometria	SM 4500 NO3 E
Nitrogênio Amoniacal	mg.L ⁻¹	Titulométrico	4500 NH3 B/C
Fósforo total	mg.L ⁻¹	Espectrofotometria	4500 P-E
Óleos e graxas	mg.L ⁻¹	Extração Soxhlet	SSM 5520
Temperatura	°C	Termômetro	-

2.3 Estimativa de produção de biogás e do potencial energético

Foi estimado neste trabalho, a partir do *software* Probio 1.0, a capacidade de geração de biogás do efluente do laticínio. Vale ressaltar que as tomadas de decisão relacionadas ao aproveitamento energético do biogás devem ser baseadas em dados reais, porém nem sempre isso é possível (Brasil, 2015), sendo essa ferramenta a que melhor representou o balanço de massa que ocorre no

reator UASB. O modelo leva em consideração todas as perdas e rotas de conversões possíveis de demanda química de oxigênio (DQO), que dificilmente são analisadas em métodos mais tradicionais (Brasil, 2015). Além disso, é pautado em três diferentes cenários: o pessimista, o típico e o otimista.

Dessa forma, foram utilizados os seguintes dados de entrada para os três cenários disponibilizados pelo modelo, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de entrada utilizados no software Probio 1.0.

Parâmetro	Unidade	Laticínio		
		Cenário Pessimista	Cenário Típico	Cenário Otimista
Equivalente populacional	hab	320	320	320
DQO total afluente	mg.L ⁻¹	5.146,7	5.146,7	5.146,7
Contribuição per capita de DQO	kg.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,11	0,11	0,11
Vazão afluente	L.dia ⁻¹	6.833,4	6.833,4	6.833,4
Temperatura	°C	25	25	25
Eficiência de remoção de DQO	%	60	65	70
Concentração de sulfato no afluente	kgSO ₄ /m ³	0,080	0,060	0,040
Eficiência de redução de sulfato	%	80	75	70
Percentual de metano no biogás	%	96,6	96,6	96,6

continua...

Tabela 2 – Continuação...

Parâmetro	Unidade	Laticínio		
		Cenário Pessimista	Cenário Típico	Cenário Otimista
Perda com gás natural (pW)	%	7,5	5,0	2,5
Perda com o efluente (pL)	%	2,7	2,2	1,6
Outras perdas (p0)	%	7,5	5,0	2,5

2.4 Elaboração do projeto

A elaboração do projeto para geração de energia elétrica a partir do tratamento do efluente do laticínio foi pautada em algumas considerações. Assim, foi proposta a implantação de um sistema contendo um tratamento preliminar, um reator anaeróbio (UASB) e um sistema para coleta, transporte, armazenamento e utilização do biogás.

O tratamento preliminar previsto foi composto apenas por uma caixa de gordura destinada a reter, na sua parte superior, as gorduras, óleos e graxas em grande concentração contidas nos resíduos do laticínio em estudo. Essa etapa foi dimensionada de acordo com a NBR 8160 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999). Já o dimensionamento do reator UASB foi embasado nas diretrizes da NBR 12209 (ABNT, 2011) e em algumas orientações indicadas em Campos (1999). Por fim, o sistema de aproveitamento de biogás foi pautado no trabalho de Lobato (2011), que realizou experimentos em escala real para aproveitamento de biogás em sistemas contendo reatores UASBs. Além disso, os itens necessários para construção e operação foram baseados no trabalho de Valente (2015).

2.5 Estudo de viabilidade técnica e econômica

Existem diversos parâmetros que permitem avaliar a viabilidade técnica de um projeto. Sendo assim, neste trabalho se optou por avaliar os seguintes critérios: estágio de desenvolvimento da tecnologia, competências técnicas, e complexidade e disponibilidade de matéria-prima.

Já para a análise de viabilidade econômica do projeto, foram avaliados os investimentos necessários para a construção das unidades responsáveis pelo tratamento do esgoto gerado pelo laticínio, bem como para implantação dos equipamentos previstos para a devida operação dessas unidades, incluindo os itens necessários para a operação do sistema de aproveitamento de biogás. Além disso, foram determinados os índices que indicam a rentabilidade do projeto.

Essa etapa se pautou na: estimativa dos custos de investimentos (CAPEX), estimativa dos custos operacionais e manutenção (OPEX), valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno e *payback descontado*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do efluente do laticínio

A partir de visitas *in loco* e de conversas com operadores e gestores, percebeu-se que a geração de efluentes na indústria ocorre de maneira intermitente, apresentando vazões horárias e sazonais de acordo com a etapa de beneficiamento de leite ao longo do dia. Porém, os maiores volumes foram gerados nos períodos em que eram realizadas operações de higienização e processamentos (turno vespertino).

Dessa maneira, foram compilados os dados referentes ao tempo médio de coleta durante as duas semanas por meio da média harmônica e se apresentou como resultado o tempo médio (t) de 63,22 segundos. Assim, a vazão volumétrica calculada foi de 6.833,4 L.d⁻¹.

Já os resultados encontrados para os parâmetros físico-químicos que caracterizam o efluente do laticínio, bem como suas respectivas médias aritméticas que objetivam dar maior representatividade a eles foram apresentados na Tabela 3.

A matéria orgânica foi identificada neste trabalho por meio dos parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). De acordo com a Tabela 3, enquanto a DBO variou entre 2.395 e 5.130 mg.L⁻¹, com média de 3.811,7 mg.L⁻¹, a DQO apresentou variação de 3.840 a 6.640 mg.L⁻¹, com média de 5.146,7 mg.L⁻¹. Assim, as concentrações e variações encontradas para esses parâmetros apresentaram certa hete-

rogeneidade quando comparadas a resultados obtidos por outros autores.

Favaretto *et al* (2015) avaliaram um laticínio na região de Passo Fundo (RS) e encontraram uma DBO média de 1.136 mg.L⁻¹ com uma variação de 596 a 1.780 mg.L⁻¹, enquanto a DQO observada em seu trabalho variou entre 1.584 e 3.528 mg.L⁻¹, com média de 2.497 mg.L⁻¹ para o efluente bruto do empreendimento. Já Pokrywiecki *et al.* (2013) analisaram o efluente de um laticínio no interior do Paraná e encontraram DBO média de 972,4 mg.L⁻¹ com uma variação de 870 a 1.050 mg.L⁻¹, enquanto a DQO observada variou entre 1.981 e 2.545 mg.L⁻¹, com média de 2.267,3 mg.L⁻¹ para o efluente bruto da empresa.

Tabela 3 – Resultados da caracterização do efluente industrial.

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Unidade
DQO	3840	6640	4960	5146,7	mg.L ⁻¹
DBO	2395	5130	3910	3811,7	mg.L ⁻¹
Sólidos totais dissolvidos	2560	1950	2120	2210,0	mg.L ⁻¹
Sólidos suspensos fixos	4	15	8	9,0	mg.L ⁻¹
Sólidos suspensos Voláteis	510	1660	1420	1196,7	mg.L ⁻¹
Nitrogênio amoniacal	28,6	34,9	30,1	31,2	mg.L ⁻¹
Nitrito	0,02	0,02	0,02	0,0	mg.L ⁻¹
Nitrato	0,2	0,3	0,3	0,3	mg.L ⁻¹
Fósforo total	33,5	47,9	38,9	40,1	mg.L ⁻¹
Óleos e graxas	75	600	448	374,3	mg.L ⁻¹
Temperatura	27,8	27,6	28	27,8	°C

Andrade (2011) avaliou um laticínio no estado de Minas Gerais e constatou para o efluente bruto do empreendimento uma DBO com variação entre 1.425 e 2.515,0 mg.L⁻¹, com média de 1.914 mg.L⁻¹. Já a DQO dele apresentou média de 4.575,0 mg.L⁻¹, com uma variação de 3.394 a 5.319,0 mg.L⁻¹. Silva (2006) encontrou uma DBO média de 1.033,0 mg.L⁻¹ sendo que a variação

para esse parâmetro foi de 496 a 1.712 mg.L⁻¹. Enquanto isso, a DQO média foi de 3.567 mg.L⁻¹, com variação de 2.120 a 4.287 mg.L⁻¹ quando se avaliou um laticínio de pequeno porte na Zona da Mata Mineira, Minas Gerais.

Essas variações foram, possivelmente, provenientes dos diferentes tipos de processamento oferecidos ao leite, bem como pela variação na

escala de produção dos produtos em relação aos diferentes dias de processamento. Além disso, as diferentes características físico-químicas da matéria-prima aliadas à falta de aplicação de medidas preventivas para reduzir a geração de resíduos e as perdas nos laticínios durante o processo foram cruciais para a heterogeneidade encontrada nos diferentes trabalhos (Loures, 2011, Saraiva, 2009; Silva, 2006).

Segundo Machado *et al* (2002), os efluentes líquidos brutos (não tratados) de laticínios apresentam valores de DBO_5/DQO na faixa de 0,50 a 0,75. Quanto maior for esse valor, maior será a fração biodegradável dos efluentes e mais indicado é o seu tratamento por processos biológicos (Saraiva, 2009). Para este trabalho, o coeficiente médio de DBO_5/DQO foi de 0,74 para o efluente bruto, o que indica elevada biodegradabilidade para o efluente em estudo.

Como visto na Tabela 3, as análises realizadas encontram valores de sólidos totais dissolvidos que variaram de 1.950 a 2.560 $mg.L^{-1}$, com média de 2.210 $mg.L^{-1}$. Já os sólidos suspensos fixos e voláteis variam de 4 a 15 $mg.L^{-1}$ e 510 a 1.660 $mg.L^{-1}$, com médias de 9,0 e 1.197 $mg.L^{-1}$, respectivamente. Logo, a concentração de sólidos totais encontrada foi de 3.416 $mg.L^{-1}$.

Vale destacar que a porção orgânica dos sólidos analisados se apresentou em frações muito maiores que a porção inorgânica. Assim, os valores encontrados para os sólidos deste estudo apresentaram significativas concentrações de componentes orgânicos e pouquíssimos minerais ou demais componentes inorgânicos. Tais resultados corroboraram com a assertiva de que o efluente possui boa biodegradabilidade, o que possivelmente garante ao produtor laticínio um significativo potencial de produção de biogás a partir do tratamento biológico do tipo anaeróbio.

Para os sólidos totais dissolvidos, Silva (2006) encontrou valores que variaram de 670 a 3.150

$mg.L^{-1}$, com média de 1.630 $mg.L^{-1}$, enquanto para os sólidos suspensos totais o autor encontrou valores que variaram de 230 a 780 $mg.L^{-1}$, com média de 470 $mg.L^{-1}$. De maneira semelhante, Henares (2015) encontrou valores médios de 424 e 268 $mg.L^{-1}$ para os sólidos dissolvidos e suspensos totais, respectivamente. Ambos os autores avaliaram indústrias que recebem diariamente em média 15 mil litros de leite, semelhantes ao produtor laticínio deste estudo. No entanto, os valores encontrados aqui se mostraram superiores, possivelmente influenciados pelos horários das coletas, feitas no pico de descarte dos efluentes e higienização das linhas de produção, ou ainda pela quantidade reduzida do número delas devido aos impasses ocasionados pela pandemia.

Em termos de sólidos totais, percebe-se que Saraiva (2009) encontrou teores que variaram de 5.298 a 5.350 $mg.L^{-1}$ em efluente de laticínios, com média de 5.324 $mg.L^{-1}$. Costa (2008) obteve resultados que variaram de 4.800 mg/L a 15.160 mg/L . Já Felipe (2009) verificou um valor médio de 2.710 mg/L , enquanto que Andrade (2011) encontrou 3.938 mg/L . Henares (2015) observou valores médios de 692 mg/L . Vale destacar que os sólidos totais em efluente bruto, neste trabalho, assemelharam-se aos dados observados por Andrade (2011).

Como visto na Tabela 3, as análises realizadas para este estudo encontram valores de nitrogênio amoniacal que variaram de 28,6 a 34,9 $mg.L^{-1}$, com média de 31,2 $mg.L^{-1}$, enquanto que o nitrito e nitrato, apresentaram valores médios de 0,02 e 0,3 $mg.L^{-1}$, respectivamente. O fósforo total variou de 33,5 a 47,9 $mg.L^{-1}$, com média de 40,1 $mg.L^{-1}$.

Nota-se que os parâmetros em destaque não apresentaram grandes variações e suas concentrações se mostraram bem inferiores aos parâmetros citados anteriormente, o que é uma característica do efluente industrial lácteo. O nitrogênio amoniacal e o fósforo foram os nutrientes

que se apresentaram em maiores concentrações, que evidencia a presença de significativas cargas orgânicas no efluente em estudo. Essa assertiva é corroborada pelas concentrações encontradas nos parâmetros DBO, DQO e sólidos orgânicos neste trabalho. Vale destacar que, de acordo com Henares (2015), a presença mais acentuada de nitrogênio amoniacal indica um efluente recente e rico em carga orgânica.

Porém, foi a concentração do fósforo em relação aos demais estudos que se mostrou preocupante. Loures (2011) encontrou valores médios de 158 mg.L⁻¹ e 108,7 mg.L⁻¹ para o nitrogênio amoniacal e fósforo total em seu trabalho, respectivamente. Amini *et al.* (2013) encontrou média de 69,32 mg.L⁻¹ para o nitrogênio e 13,12 mg.L⁻¹ para o fósforo. Cechetti (2012) encontrou valores médios de 33,34 mg.L⁻¹ para o nitrogênio e 4,51 para o fósforo. Já Macário (2016) encontrou média de 35,08 mg.L⁻¹ para o nitrogênio e 64 mg.L⁻¹ para o fósforo, semelhante a este trabalho.

De acordo com Andrade (2011), a variabilidade das características dos efluentes gerados é grande, tanto entre diferentes laticínios, quanto entre diferentes períodos, em uma mesma indústria. Assim, a elevada concentração de fósforo em relação ao nitrogênio pode estar associada à presença de detergentes utilizados na limpeza da fábrica que despejam elevados volumes de efluentes ricos em nutrientes (Brião; Tavares, 2005).

A Tabela 3 apresentou a concentração de óleos e graxas em função dos pontos de amostragem. Observou-se que parâmetro variou de 75 a 600 mg.L⁻¹, com média de 374,3 mg.L⁻¹. O valor encontrado é inferior a trabalhos como os de Saraiva *et al.* (2009) e Henares (2015), que apresentaram concentrações médias de 1.034 mg.L⁻¹ e 987 mg.L⁻¹, respectivamente. Possivelmente isso se deve ao fato de o produtor não apresentar grandes desperdícios em suas linhas de produção, controlar a destinação do soro e possuir uma boa gestão dos seus colaboradores.

Sabe-se que os reatores UASB, apesar de serem viáveis no tratamento de inúmeros efluentes orgânicos, demandam a utilização de uma unidade de pré-tratamento para remoção dessas substâncias (Loures, 2011) quando utilizados no tratamento de efluentes lácteos, que apresentam elevados teores de óleos e graxas. A unidade proposta possivelmente auxiliaria na redução do teor dessas substâncias e conseqüentemente isso pode influenciar na manutenção da eficiência do reator, o que por sua vez garantiria melhores condições na produção de biogás pelo laticínio.

Gomes (2006) analisou o efluente bruto do produtor laticínio Apreciare Alimentos Ltda, localizado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais. Lá encontrou concentrações de óleos e graxas que variaram de 41 a 348 mg.L⁻¹, com média de 116 mg.L⁻¹. O autor também propôs a utilização de uma caixa de gordura para remoção desse parâmetro. O efluente final apresentou concentração de 7 mg.L⁻¹. Outros autores também avaliaram essa nos produtores de diferentes regiões do Brasil e encontraram valores semelhantes aos deste trabalho. Felipe (2009) encontrou valores médio de 517 mg.L⁻¹; Silva (2006) de 414,0 mg.L⁻¹; e Machado *et al.* (2002), 550,0 mg.L⁻¹.

Por fim, os valores de temperatura apresentados na Tabela 3 variou de 27,6 a 28° C, com média de 27,8° C. Esta configuração se mostrou atrativa no que diz respeito ao tipo de tratamento que foi proposto para este trabalho. De acordo com Metcalf e Eddy (2015), a temperatura ótima para as atividades bacterianas em sistemas anaeróbios é na faixa de 25 a 35° C.

3.2 Estimativa de produção de biogás

O Brasil tem se destacado na produção de energia limpa desde a crise de petróleo. Entre os meios responsáveis por tais afirmações, destacam-se os substratos orgânicos. A recuperação do biogás gerado a partir da digestão anaeróbia pode oferecer importantes benefícios ambientais,

econômicos, energéticos e sociais (EPE, 2016 *apud* Gondim, 2017).

Em maio de 2021, a Associação Brasileira de Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (Abegaás) e a Associação Brasileira de Biogás (Abiogás) anunciaram a criação de um grupo de trabalho conjunto para impulsionar o uso de bio-

metano pelas concessionárias estaduais da região Nordeste do país.

Sendo assim, os resultados estimados, com o uso do software e utilizando os dados de entrada apresentados anteriormente, para a produção de biogás e do potencial energético foram dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Estimativa de produção de biogás e potencial energético.

Parâmetro	Unidade	Laticínio		
		Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Produção real de no biogás	m ³ .dia ⁻¹	25,7	30,2	34,9
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	26,6	31,2	36,2
Perda de potencial energético	kwh.dia ⁻¹	58,3	44,0	26,8
Produção normalizada de	Nm ³ .dia ⁻¹	23,5	27,6	32,0
Produção normalizada de biogás	Nm ³ .dia ⁻¹	24,4	28,6	33,1
Energia química disponível	kwh.dia ⁻¹	233,0	273,5	316,8
Taxa de emissão de	ton.ano ⁻¹	154,6	181,5	210,2
Volume unitário de produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	73,54	86,32	100,01
	Nm ³ .m ³ .esgoto ⁻¹	0,22	0,23	0,25
Volume unitário de biogás produzido	NL.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	76,14	89,38	103,54
	Nm ³ .m ³ .esgoto ⁻¹	0,22	0,24	0,26
Potencial energético unitário	kWh.m ³ .esgoto ⁻¹	6,62	7,77	9,0
	kWh.m ³ .biogás ⁻¹	9,56	9,56	9,56
	kWh.hab ⁻¹ .dia ⁻¹	0,73	0,85	0,99

De acordo com Chernicharo (2007), reatores UASBs em condições ideais direcionam a maior parte da matéria orgânica disponível para arqueas metanogênicas que são responsáveis pela produção de metano e de uma pequena parcela para bactérias sulforredutoras, o que está coerente com o observado neste trabalho. Dessa forma, os baixos valores referentes à redução do sulfato e, conseqüentemente, os elevados índices de geração de metano podem ser explicados pela baixa concentração de sulfato afluente considerada nas simulações. No entanto, essa situação

já era esperada por se tratar de um efluente industrial com altos teores de matéria orgânica e baixa concentração de sulfato em relação à DQO.

Apesar do elevado índice de DQO convertida em metano, apenas uma parcela desse valor se apresenta disponível para recuperação e utilização como fonte de energia. Os percentuais de conversão de DQO em CH₄, efetivamente disponível para aproveitamento energético nas simulações realizadas para este estudo, foram 43,6%, 50,5% e 37,1% para os cenários típico, otimista e pessimista, respectivamente. Vale destacar que,

segundo Lobato (2011), os valores médios de aproveitamento energético dentro de sistemas UASB variam de 32 a 56%. Logo, os valores encontrados neste trabalho se enquadram nas perspectivas desse autor.

Quando se observam os resultados em todos os cenários simulados, a DQO convertida em metano e, conseqüentemente, as taxas de produção volumétrica de biogás e energia produzida pelo efluente lácteo corroboram as informações mencionadas nos parágrafos anteriores. Mas de acordo com Lobato (2011), os efluentes industriais apresentam resíduos mais concentrados que os efluentes domésticos na maioria das vezes. Logo, possivelmente a soma desses fatores se tornou fundamental para a viabilidade da implantação do sistema aqui proposto.

3.3 Dimensionamento das etapas para tratamento do efluente lácteo

De acordo com a NBR 8160/1999 e como a fábrica produz grandes quantidades de óleos e graxas, considerou-se para o dimensionamento um cenário equivalente a mais de 12 cozinhas, como sugere a norma utilizada, adotando-se uma estrutura prevista de caixa de gordura especial do tipo prismática de base retangular. Os resultados encontrados para o dimensionamento da caixa de gordura foram apresentados na Tabela 5.

Já no dimensionamento do UASB, levando em consideração as recomendações da NBR 12209 (ABNT, 2011) e Campos (1999), obtiveram-se as dimensões e parâmetros apresentados na Tabela 6.

Tabela 5 – Dimensões e parâmetros de projeto da caixa de gordura.

Parâmetros	Unidade	Laticínio
Distância entre o septo e a saída	m	0,2
Volume da câmara de retenção de gordura	m ³	0,66
Altura molhada	m	0,6
Parte submersa do septo	m	0,4
Diâmetro da tubulação de saída	-	100
Área superficial	m ²	1,1
Comprimento	m	1,83
Largura	m	0,61
Distância entre anteparo e a entrada	m	1,22
Distância entre anteparo e a saída	m	0,61

Tabela 6 – Dimensões e parâmetros de projeto do reator UASB.

Parâmetro	Unidade	Laticínio Lac Bom
Volume do reator (V)	m ³	3,42
Área superficial do reator (A)	m ²	0,85
Velocidade ascensional (v)	m.h ⁻¹	0,35
Altura do reator (H)	m	4,0

continua...

Tabela 6 – Continuação...

Parâmetro	Unidade	Laticínio Lac Bom
Largura da câmara (L)	m	0,8
Comprimento da câmara (C)	m	1,1
Eficiência esperada do reator (E)	%	71,5
Número de distribuidores no reator (N)	-	2
Taxa de geração de biogás (T)	m ³ .m ⁻² .h ⁻¹	1,99
Veloc. de passagem entre as câmaras	m.h ⁻¹	0,50
Produção de lodo diária (P _{lodo})	kgSST.dia ⁻¹	5,28
Produção volumétrica de lodo (P _{lodo})	m ³ .dia ⁻¹	0,17

Vale ressaltar que as dimensões reduzidas do reator favorecem sua instalação do ponto de vista de uma estação de tratamento descentralizada. Desse modo, garante-se maior versatilidade na escolha do local de instalação. Além disso, a escolha do UASB como solução de tratamento secundário permite ainda a modulação da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), possibilitando a ampliação da capacidade de tratamento conforme o laticínio cresce.

A taxa de geração de biogás, como apresentado na Tabela 6, se mostrou dentro do limite sugerido por Campos (1999) graças ao elevado teor de DQO e a alta eficiência de conversão desta em metano.

Por fim, o sistema de aproveitamento de biogás foi dimensionado a partir dos valores obtidos pelo software utilizado. Os resultados encontrados para essa etapa foram dispostos na Tabela 7.

No reservatório pulmão, além das dimensões citadas na Tabela 7, foi utilizado lona reforçada vedada em toda a sua extensão por um selo líquido na confecção. O motogerador adotado foi um motor ciclo Otto adaptado modelo MWM30, operando a biogás, com rendimento médio de 28% e consumo médio de 10 m³.h⁻¹, seguindo orientações do fabricante.

A remoção de H₂S do biogás é fundamental não apenas por razões de saúde e de segurança, mas por razões operacionais uma vez que ele possui alto poder corrosivo e pode danificar os equipamentos. Assim, o biofiltro sugerido neste trabalho deve ser instalado antes do motogerador como medida de prevenção contra a corrosão. Vale ressaltar que Pirolli (2016) encontrou em seu trabalho a eficiência de remoção de H₂S maior que 90% no tratamento de efluentes da indústria de suínos, provando a eficácia do *biotrickling filter* (BTF) na biodessulfuração.

Além disso, devido ao armazenamento não pressurizado do gás e à baixa pressão deste proveniente do processo, Lobato (2011) sugeriu a utilização de um compressor antes do motogerador, com o intuito de manter a alimentação dessa unidade constante com o biogás. O compressor sugerido para este trabalho seguiu as orientações de Barbosa (2019) e os elementos que o compõem são: compressor de refrigeração bitzer modelo v5, motor elétrico 2 cv e um pressostato HLP 110 de 1 a 10 bar.

Por fim, seguindo as orientações de Valente (2015), foi proposto que após o reator UASB fosse implantado um selo hídrico no compar-

timento hermético, um dispositivo de purga do gás, uma válvula de bloqueio e um manômetro. Além disso, o autor ressalta também a importância da uma rota de alívio para o biogás, então foi proposta uma linha paralela à principal à jusante do gasômetro, com o objetivo de redi-

recionar o biogás durante manutenções na linha principal ou quando houver produção excedente, segundo recomendações da NBR 12.209 (ABNT, 2011). Essa linha de biogás deve ser composta pelos mesmos componentes sugeridos para a linha principal (Valente, 2015).

Tabela 7 – Dimensões e parâmetros de projeto do sistema de aproveitamento de biogás.

Unidades	Qty	Parâmetros	Unidades	Laticínio
Biofiltro H ₂ S	9	Altura	m	4
		Diâmetro	m	0,8
Reservatório pulmão	4	Volume	m ³	8
		Diâmetro	m	3,14
		Largura da vala	m	0,2
		Altura do selo hidráulico	m	0,5
Motogerador	1	Potência	kW	30

3.4 Estimativa do potencial energético disponível

Nesta etapa do trabalho, foi verificada a capacidade energética de biogás produzido pelo reator UASB do produtor laticínio a partir dos cálculos do potencial energético disponível. Vale destacar que, uma vez conhecida a vazão volumétrica do biogás (Tabela 4), foi possível calcular o número de horas de funcionamento do motogerador por dia.

No Brasil, em 2017, cerca de 8,2% da energia gerada pelo país foi proveniente de resíduos a

partir da digestão anaeróbia com recuperação do biogás, superando outras formas como a solar e a nuclear no que diz respeito a produção de energia elétrica. Vale ressaltar que o Programa de Incentivo às Fontes de Energia no Brasil (PROINFA), criado em 2002, abriu portas para que o biogás emergisse como fonte alternativa para produção de energia elétrica no país (EPE, 2016 *apud* Gondim, 2017).

A Tabela 8 apresenta os valores encontrados que caracterizaram a disponibilidade energética do sistema proposto.

Tabela 8 – Estimativa do potencial energético do laticínio.

Laticínio	Unidade	Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Produção real de biogás	m ³ .dia ⁻¹	26,6	31,2	36,2
Consumo de biogás do motogerador	m ³ .h ⁻¹	10	10	10
Funcionamento do motogerador	h	2,7	3,1	3,6

continua...

Tabela 8 – Continuação...

Laticínio	Unidade	Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Energia química disponível	kWh.dia ⁻¹	233,0	273,5	316,8
Rendimento do motogerador	%	28	28	28
Geração diária de energia elétrica	kWh.dia ⁻¹	65,2	76,6	88,7
Potência elétrica instalada	kW	24,15	24,7	24,64

Percebe-se que a capacidade volumétrica disponibilizada pelo reator foi capaz de alimentar o sistema em média por 3 a 4 horas diariamente. No entanto, o período de maior produção do laticínio ocorre das 11 às 18 horas, como citado anteriormente neste trabalho.

Além disso, segundo informações disponibilizadas pela administração do laticínio, o consumo médio mensal de energia elétrica do empreendimento no ano de 2020 foi de 3607 kWh. Logo, percebe-se que o sistema de aproveitamento de biogás proposto não atenderia a demanda mensal.

Vale destacar que, como visto na Tabela 8, o quantitativo de geração de energia elétrica diária estimada por este trabalho para o cenário otimista, por exemplo, foi de 88,7 kWh, ou ainda 2.661 kWh mensal, representando 73,8% do consumo médio mensal do produtor de laticínio.

Já para os cenários típico e pessimista representariam 63,7% e 54,2%, respectivamente.

Dessa forma, a Tabela 9 mostra detalhadamente o que foi mencionado nos parágrafos anteriores. É importante ressaltar também que quanto menos energia comprada das concessionárias (kWh), menos influência das bandeiras tarifárias no orçamento do negócio, o que pode ser bastante significativo nos períodos de estiagem.

Diante dessa realidade, a Energisa (concessionária responsável pela distribuição de energia elétrica em Sergipe, entre outros estados do Nordeste) anunciou em março de 2022 que atuaria de forma mais incisiva no mercado de energia renováveis, prometendo investir cerca de R\$ 2,4 bilhões em projetos nessa área até 2024. A produção de biometano a partir de reatores anaeróbios está como opção viável de investimento (Valverde, 2022), o que valida ainda mais a importância deste projeto.

Tabela 9 – Resumo da análise energética do laticínio.

Laticínio	Unidade	Cenário pessimista	Cenário típico	Cenário otimista
Produção mensal de energia	kWh	1.956	2.298	2.661
Consumo médio mensal de energia	kWh	3.607	3.607	3.607
Déficit energético mensal	kWh	-1.651	-1.309	-946
Autossuprimento energético	%	54,2	63,7	73,8
Custo médio mensal da energia sem aproveitamento energético de biogás	R\$	2.520,00	2.520,00	2.520,00
Economia mensal com aproveitamento energético de biogás	R\$	1.365,84	1.605,24	1.859,76
Economia anual após o aproveitamento energético de biogás	R\$	16.390,08	19.262,88	22.317,12

3.5 Análise de viabilidade

3.5.1 Viabilidade técnica

Analisando cada etapa do projeto a partir dos critérios citados no parágrafo anterior se tem, inicialmente, a etapa de pré-tratamento composta pela caixa de gordura. É uma tecnologia muito bem difundida em todo país no tocante do tratamento de efluentes em indústrias alimentícias. Além disso, é notória a disponibilidade na região de profissionais capacitados e recursos necessários para implantação, operação e manutenção da unidade, diminuindo as incertezas quanto à escolha dessa tecnologia para o projeto da Lac Bom.

A decisão de utilizar somente a fase anaeróbia (representada pelo reator UASB) no projeto de tratamento de efluentes do laticínio Lac Bom também se deve ao fato dessa tecnologia ser bastante difundida no Brasil, principalmente em regiões de clima quente, como o Nordeste do país que é onde se localiza o produtor Lac Bom. Além disso, é um sistema de operação simples, requer pouca área para sua implantação, tem baixo consumo de energia para sua operação e um possui excelente potencial de recuperação de energia (Jordão; Pessoa, 2014), se mostrando uma alternativa bastante viável para os fins deste projeto. Vale ressaltar que, como citado no parágrafo anterior, existem inúmeros projetos e profissionais na região capazes de subsidiar a construção, a operação e a manutenção desse sistema, bem como a disponibilidade de matéria-prima, por exemplo empresas de terraplanagem, fábricas de cimento e empresa especializada na confecção de estruturas em fibra de vidro para confecção do separador trifásico (tendo em vista que o reator seria construído em fibra de vidro), entre outros.

Por fim, o sistema de aproveitamento de biogás, apesar de apresentar um viés de crescimento em todo país e ter boas ações de marketing empreendidas no sentido de criar uma boa imagem da

implantação de uma tecnologia ambientalmente favorável, ainda se mostra bem menos difundido diante dos cenários atuais do que as demais tecnologias que compõem o presente projeto, principalmente em Sergipe. Tal fato pode se configurar em um cenário desfavorável à sua implantação. De acordo com Valente (2015), no Brasil em 2015 existiam menos de cinco ETEs que utilizavam o biogás oriundo dos reatores UASB para geração de energia. Constatou-se que a baixa disponibilidade tanto de matéria-prima quanto de mão de obra especializada na região pode ser um fator agravante para a implantação dessa tecnologia. Observa-se que, por exemplo, orçamentos e especificações de motogeradores de pequeno porte foram encontrados predominantemente em empresas da região Sudeste, enquanto os de grande porte provêm de empresas fora do país (Brasil, 2017), possivelmente comprometendo a estimativa dos recursos e do tempo necessário para a instalação desse sistema. Houve outros materiais que também não foram encontrados no mercado local, além de profissionais capacitados para instalação e manutenção do sistema.

3.5.2 Viabilidade econômica

A Tabela 10 mostra que a saída de caixa no tempo zero refere-se ao CAPEX deste trabalho. Já o fluxo de caixa durante o tempo que foram realizados os cálculos equivalem à economia anual após aproveitamento energético do biogás (receitas) e OPEX (custos), corrigidos anualmente pela inflação.

Para tanto, foi considerado um cenário de dez anos, tempo médio da vida útil de alguns equipamentos do sistema proposto. A taxa mínima de atratividade (TMA) deste trabalho foi de 5,20% obtida a partir do Banco Nacional de Desenvolvimento, que por sua vez, contou com o somatório do custo financeiro para fevereiro de 2021, com a remuneração para investimentos abaixo de 20 milhões e com reduções do consumo de energia e aumento da eficiência elétrica, além da taxa de risco de crédito para investimentos em saneamento e energia (BNDES, 2021).

Tabela 10 – VPL, TIR e payback descontado do laticínio (cenário otimista) considerando os custos de todo o sistema.

Investimento Inicial (CAPEX)	R\$ 142.190,25
Custo anual (OPEX)	R\$ 6.619,11
Receita anual (economia energética)	R\$ 22.317,12
TMA	5,20%
VPL	R\$ 6.993,87
TIR	6,13%
Payback descontado	9,53 anos

A partir do que foi observado na Tabela 10 se percebeu que o sistema proposto para o produtor se mostrou viável economicamente uma vez que foram cumpridos os requisitos necessários para atingir esse objetivo, ou seja, tanto o VPL deu positivo quanto à taxa interna de retorno (TIR) foi maior que a TMA. Além disso, o projeto apresentou um tempo de retorno de 9,53 anos.

A importância dessa viabilidade em um projeto proposto no estado de Sergipe fica ainda mais relevante quando este colocou em pauta, em julho de 2022, uma audiência pública com o objetivo de definir diretrizes para movimentação e comercialização do biogás/biometano no estado assim que a Associação Brasileira de Biogás (Abiogás) percebeu que Sergipe era o único estado sem nenhum ato administrativo que regulamente ou estimule a indústria de biogás e biometano (EPBR, 2022).

Sendo assim, a Agência Reguladora dos Serviços Públicos de Sergipe (Agrese) defendeu que o biogás se mostra como uma eminente fonte alternativa de suprimento energético para a concessionária no estado sergipano (EPBR, 2022).

4 CONCLUSÃO

No Brasil, poucas indústrias utilizam o biogás oriundo dos reatores UASB para geração de energia, muitas vezes alegando que a principal razão para não haver mais projetos é a falta de viabilidade econômica esse tipo de solução. Diante disso, este trabalho partiu da hipótese

de que o aproveitamento energético do biogás oriundo do tratamento de efluentes em indústria do ramo alimentício pode apresentar viabilidade técnico-econômica.

Sendo assim, a caracterização quantitativa e qualitativa do efluente gerado pelo laticínio encontrou uma vazão média diária de 6.833,4 litros de esgotos gerados a partir da linha de processamento da indústria, incluindo material de higienização, raspas e líquidos que escapam durante a produção, que por sua vez possuem canalização divergente a do soro.

Vale ressaltar que tal caracterização apresentou valores baixos quando comparados a outros empreendimentos com capacidade de recebimento e processamento semelhantes ao do produtor laticínio apresentado neste trabalho. Tais fatos podem estar relacionados com o baixo quantitativo de produtos gerado por ele, as tecnologias de fabricação utilizada, as condições de funcionamento da indústria e o baixo aproveitamento do soro.

Já em termos qualitativos, o efluente bruto do laticínio Lac Bom apresentou uma elevada biodegradabilidade em termos do coeficiente médio DBO_5/DQO , sendo este de 0,74. Os valores encontrados de sólidos corroboraram a assertiva que o efluente apresenta boa biodegradabilidade, o que possivelmente garante ao empreendimento um significativo potencial de produção de biogás a partir do tratamento biológico anaeróbio.

Diante das condições ambientais favoráveis e na busca por viabilidade, optou-se pelo dimensionamento do reator UASB como principal tratamento do efluente do laticínio, com o intuito de geração de biogás e aproveitamento energético. A decisão de se utilizar somente a fase anaeróbia para o tratamento de efluentes de laticínios no lugar dos tratamentos convencionais passa obrigatoriamente pelo conhecimento dos fatores econômicos que envolvem o projeto.

Para tanto, foi realizada a estimativa de produção de biogás com base nos parâmetros do esgoto. Foi encontrado um volume de biogás de $36,2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ nas melhores condições possíveis para o sistema, considerando uma eficiência de 65% na remoção de DQO e 50,5% de conversão de DQO em CH_4 . Além disso, o sistema apresentou um potencial energético de $316,8 \text{ kWh} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Para geração de energia, optou-se pelo motor-generador de ciclo Otto com potência de 30 kVA funcionando por cerca de 3 a 4 horas por dia e com rendimento de 28%, garantindo ao sistema uma produção diária de 88,7 kWh, equivalente a 2.661 kWh mensal. Vale ressaltar que o consumo médio mensal de energia elétrica do laticínio foi de 3607 kWh, garantindo-lhe um custo médio mensal de R\$ 2.520,00. Logo, com o aproveitamento energético foi possível uma economia mensal de R\$ 1.859,76 ou R\$ 22.317,12 anual, ou seja, o aproveitamento energético do biogás dessa indústria de laticínio reduziria em até 73,8% seu gasto com energia elétrica.

Quanto à viabilidade técnica, foi possível observar que as competências técnicas e a disponibilidade de material não apresentaram nenhum empecilho quanto ao tratamento dos efluentes no empreendimento. Porém, o desenvolvimento da tecnologia do biogás ainda é recente em relação aos elementos para sua conversão em energia elétrica nas indústrias de laticínios. Por se tratar de uma aplicação não usual, a incerteza quanto

à funcionalidade e real benefícios pode dificultar o interesse em realizar investimentos. Isso significa que a maior complexidade identificada foi com relação à montagem dos elementos para aproveitamento do biogás, uma vez que não existe uma norma específica que oriente os profissionais quanto ao dimensionamento ou comercialização local.

Por fim, a viabilidade econômica foi comprovada através da avaliação dos investimentos e considerando o potencial de geração de energia do produtor. Os custos foram agregados nos parâmetros CAPEX e OPEX, sendo estes de R\$ 142.190,25 e R\$ 6.619,11 por ano, respectivamente. Assim, o projeto apresentou um VPL de R\$ 6.993,87, com um payback descontado de 9,53 anos. Já a TIR foi de 6,13%, maior que a TMA (5,20%).

Conclui-se que o sistema de geração de energia a biogás do laticínio se mostrou uma alternativa atrativa, além de proporcionar ganho ambiental com o tratamento de efluentes e redução da emissão de gases de efeito estufa. Dessa forma, o desenvolvimento de novos projetos para geração de energia a partir de biogás proveniente de reatores anaeróbios se apresenta como uma forma revolucionária e viável para que as indústrias alimentícias possam reduzir o seu consumo de energia elétrica.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES<SUB1>

Conceitualização, Santos LVA; **Metodologia**, Santos LVA e Lima DMF.; **Investigação**, Santos LVA; **Redação – Primeira versão**, Santos LVA; **Redação – Revisão & Edição**, Santos LVA e Lima DMF; **Aquisição de Financiamento**, Santos LVA; **Recursos**, Santos LVA, Lima DMF; **Supervisão**, Santos LVA e Lima DMF.

6 REFERÊNCIAS

AHMAD, T. *et al.* Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. **Trends in Food Science & Technology**, Cambridge, v. 88, p. 361-372, 2019.

- AMINI, M. *et al.* Determination of optimum conditions for dairy wastewater treatment in UAASB reactor for removal of nutrients. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 145, p. 71-79, 2013.
- ANDRADE, L. H. **Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso**. 2011. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22. ed. Washington, DC: APHA, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8160**: Sistemas prediais de esgoto sanitário – Projeto e execução. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- BARBOSA, T. A. **Produção de energia renovável a partir do biogás em empreendimentos habitacionais: análise técnica, econômica e ambiental visando o desenvolvimento urbano sustentável**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **BNDES Finem Crédito para projetos Direto**: Financiamentos para projetos de investimentos, públicos ou privados, voltados à geração e aumento de capacidade produtiva, nos diversos setores da economia. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/bndes-finem>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Catálogo de tecnologias e empresas de biogás**. Brasília, DF: Probiogás, 2015.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETE's a partir do biogás**. Brasília, DF: Probiogás..., 2017.
- BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G. Geração de efluentes nas indústrias de laticínios: atitudes preventivas e oportunidades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23, 2005, Campo Grande. **Anais [...]**. Campo Grande: ABES, 2005.
- BOLDRIN, A. *et al.* Optimised biogas production from the co-digestion of sugar beet with pig slurry: Integrating energy, GHC and economic accounting. **Energy**, Amsterdam, v. 112, p. 606-617, 2016.
- CAMPOS, J. R. (Coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro; ABES, 1999.
- CECHETTI, M. P. **Análise técnica da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de laticínios**. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Paço Fundo, Paço Fundo, 2012.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- COSTA, A. M. G. **Desempenho de filtro anaeróbio no tratamento de efluente formulado com diferentes concentrações de soro de queijo**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- FAVARETTO, D. P. C. *et al.* Análise técnica do processo de tratamento de efluentes de empresa de laticínios da região de Passo Fundo/RS. **Revista Ciatec**, Passo Fundo, v. 7, n. 2, p. 18-30, 2015.
- FELIPPE, S. W. **Caracterização e tratabilidade do efluente líquido da indústria de laticínios Fortuna LTDA, Rio Fortuna-SC**. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2009.
- GOMES, A. L. **Análise técnica e econômica de filtro anaeróbio utilizado para tratamento de efluentes líquidos de uma indústria de laticínios** – Estudo de caso. 2006. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- GONDIM, G. V. **Potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos gerados em uma unidade agroindustrial**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado de São Paulo, Ilha Solteira, 2017.
- HENARES, J. F. **Caracterização do efluente de laticínio: análise e proposta de tratamento**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Alimentos) – Departamento Acadêmico de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.
- JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7. edição. Rio de Janeiro: ABES, 2014.
- LIMA, A. C. G.; PASSAMANI, F. C. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido no reator UASB da ETE-UFES**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.
- LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento,

Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LOURES, C. C. A. **Estudo de Aplicação UV/FETON (Fe²⁺/H₂O₂) no tratamento de efluente de laticínio.** 2011. Dissertação (Mestrado em Novos Materiais e Química Fina) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.

MACÁRIO, S. C. A. **Influência do inóculo na produção de hidrogênio a partir do soro do queijo em pó, da lactose isolada e do efluente da indústria de laticínios em reator anaeróbio de leite fluidificado.** 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

MACHADO, R. M. G. *et al.* **Controle ambiental em pequenas e médias indústrias de laticínios.** Belo Horizonte, SEGRAC, 2002.

METCALF, L; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** 5. ed. São Paulo: Editora UFMG, 2015.

PIROLI, M. **Avaliação da remoção de sulfeto de hidrogênio de biogás provindo da digestão de efluentes suínicos utilizando biofiltro em escala piloto.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

POKRYWIECKI, T. S. *et al.* Avaliação do processo de tratamento de efluentes de laticínios. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 11, sup. 1, p. S155-S161, 2013.

SARAIVA, C. B. **Potencial poluidor de um laticínio de pequeno porte: um estudo de caso.** 2009. Dissertação (Mestrado

– Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, 2009.

SILVA, D. J. P. **Diagnóstico de geração de resíduos e consumo de água em uma indústria de laticínio e desenvolvimento de um sistema multimídia de apoio à decisão.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

STEFFENS, F. H. **Produção de metano a partir de codigestão anaeróbia de vinhoto e glicerol residuais.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

TABATABAEI, M. *et al.* Importance of the methanogenic archaea populations in anaerobic wastewater treatments. **Process Biochemistry**, Essex, v. 45, n. 8, p. 1214-1225, 2010.

VALENTE, V. B. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em estações de tratamento de esgoto no Brasil.** 2015. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VALVERDE, M. Energisa cria marca para atuar na área de baixo carbono. **Diário do Comércio**, 24 mar. 2022. Disponível em <https://www.diariodocomercio.com.br/economia/energia-cria-marca-para-atuar-na-area-de-baixo-carbono>. Acesso em: 25 maio 2023.

WANG, Y.; SERVENTI, L. Sustainability of dairy and soy processing: A review on wastewater recycling. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 237, 117821, 2019.