



TRATAMENTO ANAERÓBIO DE SORO DE LEITE EM REATOR UASB: DESEMPENHO, ESTABILIDADE E POTENCIAL ENERGÉTICO

Bianca Rodrigues Santos¹, João Henrique Rodrigues de Sá², João Henrique Nogueira dos Santos³, Miriam Cleide Cavalcante de Amorim⁴

¹Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, BA, Brasil
(bianca.rodrigues@discente.univasf.edu.br)

²Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, BA, Brasil

³Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, BA, Brasil

⁴Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, BA, Brasil

Resumo: O soro de leite, principal subproduto da fabricação de queijo coalho, apresenta elevada carga orgânica e fermentescibilidade, configurando-se como um dos efluentes mais críticos da agroindústria láctea. Este estudo avaliou seu tratamento por digestão anaeróbia em reator UASB, com ênfase na aclimação da biomassa e no potencial de geração de metano. Na etapa contínua (COV 7,37 gDQO/L.dia; TDH 6 h), o reator alcançou 26,4% de remoção de DQO, 93,2% de turbidez e produção de 2,8 L CH₄/dia (23,8 kcal). Reatores UASB representam alternativa promissora para tratamento sustentável desse resíduo em escala rural.

Palavras-chave: Soro de leite; Reator UASB; Digestão anaeróbia; Biogás; Queijo coalho

INTRODUÇÃO

A fabricação artesanal de queijo coalho constitui uma das mais expressivas tradições agropecuárias do semiárido nordestino. Segundo a Embrapa (2012), esse produto possui origem nordestina historicamente documentada, com raízes culturais e econômicas profundamente ligadas à agricultura familiar e às pequenas unidades produtoras. Em regiões onde as alternativas de geração de renda são historicamente restritas, a queijaria artesanal representa um elo fundamental na cadeia produtiva local, sendo responsável pela subsistência de inúmeras famílias rurais, especialmente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco e Piauí (Embrapa, 2012; Santos, 2013).

O processo de fabricação do queijo coalho gera, inevitavelmente, o soro do leite como principal subproduto. Para cada quilograma de queijo produzido, estima-se a geração de 8 a 10 litros de soro, o que implica que aproximadamente 85 a 90% do volume de leite processado é convertido nesse resíduo líquido (Santos, 2013). Em termos de composição físico-química, o soro retém cerca de 55 a 60% dos sólidos totais originalmente presentes no leite integral, incluindo proteínas solúveis como beta-lactoglobulina e alfa-lactoalbumina, lactose em concentrações de até 50 g/L, vitaminas do complexo B, cálcio, fósforo e potássio (Von Sperling, 2005; Santos, 2013). A lactose, em particular, é o

componente que mais contribui para a elevada carga orgânica do efluente, expressa em valores de Demanda Química de Oxigênio (DQO) que podem superar 80.000 mg O₂/L em amostras brutas concentradas.

Do ponto de vista ambiental, o descarte inadequado do soro de leite representa uma das principais fontes de poluição difusa associadas à agroindústria láctea de pequeno porte. De acordo com Von Sperling (2005), efluentes com elevada carga orgânica lançados em corpos receptores sem tratamento prévio promovem a eutrofização acelerada, a depleção do oxigênio dissolvido e o comprometimento irreversível da biota aquática. Estima-se que cada litro de soro bruto exerça uma demanda de oxigênio equivalente à de 40 a 60 vezes o volume correspondente de esgoto doméstico (Castro et al., 2013), evidenciando a magnitude do impacto ambiental mesmo quando se trata de pequenas produções artesanais. Essa realidade é agravada pela ausência de infraestrutura de saneamento nas propriedades rurais, onde o soro frequentemente é descartado diretamente no solo, em córregos ou em fossas, sem qualquer tratamento.

Frente a esse cenário, os sistemas de tratamento biológico anaeróbio têm se consolidado como alternativa técnica e economicamente viável para o tratamento de efluentes agroindustriais de elevada carga orgânica. Dentre as tecnologias disponíveis,



destaca-se o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), desenvolvido originalmente por Lettinga et al. (1984) na Universidade de Wageningen, Holanda. O princípio de funcionamento do reator UASB baseia-se no escoamento ascendente do efluente através de um manto de lodo granular biologicamente ativo, promovendo o contato íntimo entre o substrato e a biomassa. A zona de separação trifásica, posicionada na parte superior do reator, é responsável pela separação eficiente entre o biogás produzido, o lodo e o efluente tratado (Chernicharo, 2007; Lettinga et al., 1984).

As vantagens dos sistemas anaeróbios, e do reator UASB em particular, em relação aos sistemas aeróbios convencionais são amplamente documentadas na literatura técnica. Chernicharo (2007) destaca: (i) baixo consumo energético, pela ausência de aeração mecânica; (ii) reduzida produção de lodo biológico, com menor custo de disposição final; (iii) menor demanda de área construtiva; (iv) capacidade de geração de biogás, com potencial de aproveitamento energético; e (v) possibilidade de operação intermitente, sem comprometimento significativo da biomassa. Essas características tornam os reatores UASB especialmente atrativos para aplicação em pequenas agroindústrias rurais, onde o acesso a energia elétrica e a mão de obra especializada são frequentemente limitados.

O processo anaeróbio de degradação da matéria orgânica ocorre por meio de uma cadeia de reações bioquímicas sequenciais e interdependentes, envolvendo quatro grupos microbianos distintos. A primeira etapa, denominada hidrólise, consiste na quebra de macromoléculas complexas — proteínas, lipídios e carboidratos — em compostos mais simples (aminoácidos, ácidos graxos de cadeia longa e açúcares), catalisada por enzimas extracelulares secretadas por bactérias hidrolíticas (Abreu, 2007). Na etapa subsequente, a acidogênese, os produtos da hidrólise são fermentados por bactérias acidogênicas a ácidos graxos voláteis (AGVs), principalmente ácido acético, propiônico e butírico, além de álcoois, CO_2 e H_2 . A acetogênese converte os AGVs de cadeia mais longa em acetato, CO_2 e H_2 , tornando-os disponíveis para as arqueas metanogênicas. Finalmente, na metanogênese, esses compostos são convertidos em metano e gás carbônico, estabilizando a matéria orgânica e reduzindo significativamente a carga poluidora do efluente (Chernicharo, 2007; Abreu, 2007).

Um dos principais desafios operacionais na digestão anaeróbia do soro de leite é a sua elevada fermentescibilidade, decorrente das altas concentrações de lactose e proteínas solúveis. Essa característica favorece uma acidogênese acelerada e intensa, levando ao acúmulo de AGVs em velocidade superior à capacidade de consumo pelas arqueas

metanogênicas, que são organismos de crescimento lento e estritamente sensíveis ao pH. Quando a concentração de AGVs supera a capacidade tampoadora do sistema, ocorre queda progressiva do pH a valores inferiores a 5,5, faixa em que a atividade metanogênica é severamente inibida ou completamente suprimida — fenômeno conhecido como "acidificação" ou "colapso ácido" do reator (Casallas-Ojeda et al., 2024; Escalante-Hernández et al., 2017). O controle rigoroso da carga orgânica aplicada, da alcalinidade do meio e do pH é, portanto, condição fundamental para o êxito do processo.

A literatura recente reporta resultados promissores para o tratamento anaeróbio do soro de leite com diferentes configurações de reatores. Silva (2020) obteve reduções de até 90% na DBO e 85% na DQO em reatores anaeróbios de escala piloto instalados em queijarias de pequeno porte no estado de Minas Gerais. Vasconcelos (2016) registrou rendimento médio de produção de metano de $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ removida, valor próximo ao potencial teórico máximo de $0,35 \text{ L CH}_4/\text{g DQO}$ para substratos predominantemente carboidratados. Castro et al. (2013) ressaltam que a eficiência do sistema é fortemente dependente da estratégia de partida adotada e do tempo de aclimação da biomassa ao substrato específico. Com base nesse panorama, o presente trabalho objetivou caracterizar o soro de leite gerado por queijarias artesanais da região do Submédio São Francisco e avaliar o desempenho de um reator UASB em escala de bancada no tratamento desse efluente, analisando a eficiência de remoção de poluentes, a estabilidade do processo e o potencial energético do biogás gerado.

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta do efluente e inóculo

O soro de leite utilizado como substrato afluente foi proveniente de duas unidades de produção artesanal de queijo coalho localizadas na região do Submédio São Francisco. A primeira propriedade situa-se na Agrovila N6, zona rural de Petrolina-PE, com produção semanal de 1 a 2 kg de queijo. A segunda unidade, de maior porte, encontra-se na Fazenda Alto do Jaleco, município de Conceição do Canindé-PI (coordenadas: -7.8380, -41.6135), com capacidade produtiva semanal de aproximadamente 7 kg. A escolha dessas duas unidades permitiu a obtenção de amostras representativas de diferentes escalas de produção e práticas de fabricação, ampliando a representatividade do estudo.

As coletas foram realizadas em seis etapas, totalizando 72 litros: três amostras de 12 L coletadas em cada propriedade. Em todas as ocasiões, o soro foi amostrado imediatamente após a dessoragem do queijo, transferido para bombonas plásticas

higienizadas com capacidade de 20 L e 5 L, devidamente vedadas e identificadas. O transporte foi realizado em caixas isotérmicas com gelo e as análises foram executadas em até 24 horas após a coleta, para preservar as características físico-químicas originais do efluente. O inóculo utilizado consistiu em lodo anaeróbio granular coletado no decantador do reator UASB da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) operada pela COMPESA no município de Petrolina-PE, em abril de 2023. A escolha desse inóculo baseou-se na sua consolidada atividade metanogênica e na estabilidade granular, características determinantes para a partida eficiente de reatores anaeróbios tratando substratos de alta fermentescibilidade (Lettinga et al., 1984; Amorim, 2015).

Caracterização do efluente e inóculo

As análises físico-químicas (Tabela 1) foram realizadas no Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA/UNIVASF, Campus Juazeiro-BA), seguindo os protocolos do Standard Methods (APHA, 2017).

Tabela 1. Parâmetros analisados no efluente bruto e inóculo.

Parâmetro	Unidade	Inóculo	Efluente
Sólidos Totais (g/L)	g/L	366,82	—
ST Fixos / ST Voláteis (g/L)	g/L	66,48 / 300,34	—
DQO (mg O ₂ /L)	mg O ₂ /L	42.549,5	46.106,51
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	mg O ₂ /L	—	2.350,00
Alcalinidade Total (mg CaCO ₃ /L)	mg/L	975,60	381,21
N-NH ₃ (mg N-NH ₃ /L)	mg/L	118,50	4,85
AGV (mg/L)	mg/L	11.387,48	—
pH	—	6,05	3,92
Condutividade (cmS/cm)	cmS/cm	—	34,63
Cloretos (mg Cl/L)	mg/L	—	9.066,25
Fósforo Total (mg P/L)	mg/L	77,51	6,34

Fonte: Autores (2025).

Aclimação e operação do reator

A COV foi fixada em 7,377 gDQO/L.dia com TDH de 6 horas (Amorim, 2015). A aclimação (5 dias, batelada) seguiu escalonamento progressivo: 1,5 gDQO/L.dia (dia 1) → 3,0 (dia 3) → 6,0 (dia 5), com monitoramento diário de DQO, pH, alcalinidade, AGVs e temperatura. O sistema experimental (Figura 1) foi composto por: (i) reservatório de afluente com bomba peristáltica (8,72 mL/min); (ii) reator UASB (1,2 L útil) com separação trifásica; (iii) câmara de deslocamento com NaOH 3% para absorção de CO₂ e quantificação indireta de metano; e (iv) manta térmica para manutenção de 30 ± 2 °C. Na fase contínua (03–09/06/2025), o afluente foi diluído 1:50 e bombeado à COV de 7,37 gDQO/L.dia. A produção teórica de metano foi estimada pela relação estequiométrica de 1 mol CH₄/64 g DQO removida e pelo poder calorífico de 191,5 kcal mol⁻¹.

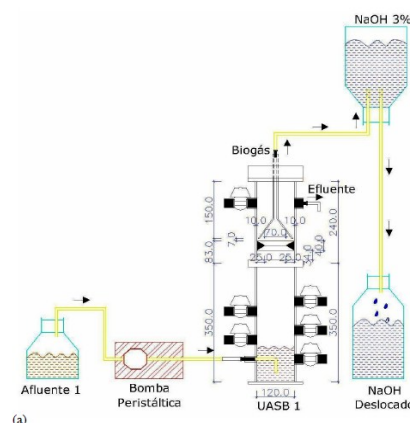


Figura 1. Esquema do sistema experimental com reator UASB em bancada (Amorim, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fase de aclimação

A Tabela 2 apresenta os resultados monitorados durante a aclimação. Observa-se queda progressiva da DQO indicando conversão da matéria orgânica — associada à redução contínua do pH e acúmulo de AGVs, padrão típico de acidogênese intensa em substratos de alta fermentescibilidade, como o soro de leite (Chernicharo, 2007; Casallas-Ojeda et al., 2024).

Tabela 2. Parâmetros monitorados durante a aclimação.

Data	DQO (mg O ₂ /L)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	AGVs (mg/L)	pH	Temp. (°C)
30/05	57.462,86	3.543,84	1.250	6,79	31
01/06	2.926,97	762,10	2.300	5,87	32
03/06	1.195,96	760,10	3.000	4,96	34

Fonte: Autores (2025).

No dia 30/05, a alcalinidade adequada (3.543 mg CaCO₃/L) sustentou pH de 6,79 e baixos AGVs (1.250 mg/L), cenário compatível com estabilidade inicial. Em 01/06, a drástica queda da alcalinidade para 762 mg/L evidenciou esgotamento da capacidade tamponante, com AGVs elevando-se a 2.300 mg/L e pH caindo para 5,87. Na última medição da batelada (03/06), AGVs de 3.000 mg/L e pH de 4,96 exigiram a transição para fluxo contínuo, a fim de evitar o colapso metanogênico — comportamento esperado para digestão de soro de leite puro sob altas cargas (Casallas-Ojeda et al., 2024; Escalante-Hernández et al., 2017). Lettinga et al. (1983) e Amorim (2015) apontam 1.000–3.000 mg/L de AGVs como faixa crítica para manutenção da estabilidade sem acidificação aguda.

Operação contínua e eficiência de remoção

A Tabela 3 apresenta a caracterização do efluente bruto e tratado. O reator alcançou 26,4% de remoção de DQO, evidenciando atividade biológica relevante mesmo sob condições subótimas (pH final 3,92; diluição 1:50). As reduções de turbidez (93,2%) e condutividade elétrica (92,4%) foram expressivas,

enquanto a alcalinidade do efluente tratado aumentou (381 → 754 mg CaCO₃/L), indicando início de tamponamento. A elevação dos cloretos (9.066 → 15.490 mg Cl/L) e a DQO residual ainda elevada limitam o reuso direto do efluente, reforçando a necessidade de polimento pós-tratamento. Castro et al. (2013) ressaltam que ajustes na COV e no controle de pH são determinantes para melhor desempenho em reatores anaeróbios tratando efluentes lácteos.

Tabela 3. Eficiência de remoção na operação contínua (03–09/06/2025).

Parâmetro	Unidade	Bruto	Tratado	Ef. (%)
DQO	mg O ₂ /L	46.106,51	33.944,01	26,4
pH	—	6,20	3,92	—
Cor (µC)	µC	277	220	20,6
Turbidez (NTU)	NTU	814	55	93,2
Cloretos (mg Cl/L)	mg/L	9.066,25	15.490	—
N-NH ₃ (mg N/L)	mg/L	4,85	6,35	—
Fósforo Total (mg P/L)	mg/L	6,34	3,12	50,8
Condutividade (cmS/cm)	cmS/cm	34,63	2,62	92,4
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	mg/L	381,21	753,87	—

Fonte: Autores (2025).

Produção de biogás e potencial energético

Ao longo dos seis dias de operação contínua, a produção acumulada de biogás totalizou 4.920,06 mL, com perfil temporal caracterizado por baixa produção inicial, pico intermediário e redução gradual nas etapas finais. Nos dias 04 e 05/06, os volumes registrados foram 283,16 mL e 18,49 mL, respectivamente — volumes reduzidos que refletem a fase de adaptação da microbiota ao novo regime de alimentação e ao substrato diluído, período em que as populações metanogênicas ainda não haviam atingido sua plena capacidade fermentativa (Chernicharo, 2007; Casallas-Ojeda et al., 2024).

A partir do dia 06/06 (706,76 mL), verificou-se incremento expressivo na produção, atingindo o pico em 07/06 com 2.833,66 mL, valor que correspondeu a 57,6% do volume total acumulado em todo o experimento. Esse pico de produção coincide com o período de maior equilíbrio entre a produção de AGVs e a capacidade metanogênica do sistema, antes que a acidificação progressiva do meio atingisse níveis de inibição severa. A redução observada nos dias 08 e 09/06 (284,49 mL e 793,50 mL, respectivamente) é consistente com a inibição da metanogênese pelo pH em declínio, que permaneceu abaixo de 5,0 durante toda a fase contínua. Vasconcelos (2016) e Escalante-Hernández et al. (2017) reportaram padrões semelhantes em experimentos com soro de leite, nos quais picos de produção de biogás foram sempre precedidos por curtos períodos de equilíbrio entre as fases acidogênica e metanogênica.

No dia de maior rendimento (07/06), a produção efetiva de CH₄ estimada pelo método direto foi de 2,8 L, equivalentes a 23,8 kcal (99,58 kJ) de energia, ou aproximadamente 22,7 Wh de eletricidade útil, considerando rendimento de conversão de 30% em motor a gás (Castro et al., 2013). Pelo método indireto, baseado na massa de DQO removida no mesmo dia, os valores calculados foram 60,32 kcal (252,39 kJ ou ≈ 70,2 Wh), divergência que reflete o aproveitamento apenas parcial do potencial energético teórico pelo processo real, dado que parte do CH₄ gerado pode ter permanecido dissolvido no efluente ou sido perdido por vazamentos nas conexões do sistema de bancada. A relação entre o metano efetivamente coletado e o teórico calculado indica um rendimento de captura de aproximadamente 39%, valor que pode ser substancialmente melhorado em escala maior com hermeticidade adequada do sistema e controle de pH por adição de alcalinizante (Von Sperling, 2007; Amorim, 2015).

Para contextualizar o potencial energético em escala produtiva, considerando uma queijaria artesanal de médio porte com produção de 20 kg de queijo por semana e geração correspondente de aproximadamente 180 L de soro, e adotando o rendimento médio de 0,35 m³ CH₄/kg DQO removida reportado por Vasconcelos (2016), seria possível gerar cerca de 1,8 m³ de metano por semana — energia suficiente para suprir parcialmente a demanda de aquecimento de água do próprio processo produtivo. Esse dado reforça a pertinência técnica e o apelo econômico do tratamento anaeróbio do soro de leite em escala rural, especialmente em regiões com acesso limitado à rede elétrica convencional.

CONCLUSÃO

O reator UASB demonstrou ser uma tecnologia promissora para o tratamento anaeróbio do soro de leite artesanal, com remoções expressivas de turbidez (93,2%) e condutividade elétrica (92,4%), e geração de biogás com pico de 2,8 L CH₄/dia (23,8 kcal). A intensa acidogênese limitou a eficiência de remoção de DQO (26,4%), evidenciando que o sucesso do processo depende de controle rigoroso de pH, alcalinidade e carga orgânica aplicada. O potencial energético verificado — especialmente pelo método da tratabilidade (60,32 kcal/dia) — reforça a viabilidade técnica do aproveitamento do biogás em escala rural. Conclui-se que a tecnologia UASB, aliada a estratégias adequadas de controle operacional, representa alternativa promissora para o tratamento sustentável desse resíduo, fortalecendo a integração entre saneamento ambiental e produção de energia em agroindústrias de pequeno porte. Novos estudos são incentivados para otimizar a fase metanogênica e ampliar a escala do sistema.



AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UNIVASF pelo apoio institucional, ao Laboratório de Engenharia Ambiental (LEA) e à professora Miriam pelo suporte e orientação.

REFERÊNCIAS

Abreu, E. F. Estudo da diversidade microbiana metanogênica em reatores UASB tratando esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária), UFMG, Belo Horizonte, 2007.

Amorim, M. C. C. de. Estudos de caracterização, biodegradabilidade e tratamento de manipueira proveniente de casas de farinha. Tese (Doutorado em Engenharia Química), UFPE, Recife, 2015.

APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington: American Public Health Association, 2017.

Casallas-Ojeda, C. et al. Understanding the acidification risk of cheese whey anaerobic digestion under psychrophilic and mesophilic conditions. *Heliyon*, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26476.

Castro, E. A. et al. Avaliação do desempenho de reatores anaeróbios no tratamento de efluente lácteo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 4, p. 379-386, 2013.

Chernicharo, C. A. L. Reatores Anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

Embrapa. Queijos artesanais brasileiros: patrimônio cultural e segurança alimentar. Brasília: Embrapa, 2012.

Escalante-Hernández, H. et al. Feasibility of the anaerobic digestion of cheese whey in a plug flow reactor under local conditions. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 2017.

Lettinga, G. et al. High-rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 26, p. 273-282, 1984.

Santos, M. L. dos. Potencial de aproveitamento do soro de leite e alternativas tecnológicas para seu tratamento. *Revista Gestão Industrial*, v. 9, n. 4, p. 780-796, 2013.

Silva, M. A. da. Aplicação de bioprodutos com atividade lipásica no tratamento de efluentes lácteos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), UFSJ, 2020.

Von Sperling, M. Reatores anaeróbios. Belo Horizonte: UFMG, 2007. (Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5).

Von Sperling, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005.