

# ENERGIA ALTERNATIVA NA INDÚSTRIA LÁCTEA: A PRODUÇÃO E APROVEITAMENTO DE BIOGÁS NUMA PEQUENA QUEIJARIA MINHOTA

## Alternative Energy in Dairy Industry: Production and Utilization of Biogas in a Small Northern Portuguese Cheese Factory

CHIA-YAU CHENG

Professor Auxiliar Convidado e Director do Laboratório de Engenharia Sanitária, FEUP  
Rua Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal, cheng@fe.up.pt

### Resumo

Uma pequena queijaria Minhota com problemas de rejeição do seu subproduto principal (10 m<sup>3</sup>/dia de soro lácteo com uma potência poluente equivalente ao esgoto de 4200 habitantes) foi financiada pela MAPE, no âmbito do programa PRIME, para construção de um sistema de digestão anaeróbio destinado à produção de bioenergia para consumo interno. O sistema, projectado de acordo com a concepção da ECP, inclui a integração das instalações existentes e das de produção e utilização de energia, a aplicação de material adequado para o ambiente local e a natureza do serviço, a optimização do funcionamento e a minimização de riscos. Os dois reactores em série correspondem às duas fases principais distintas de conversão de material orgânico para biogás. O sistema produz uma quantidade de 4010 MJ/d de energia térmica, dos quais, na situação mais desfavorável, 76% são transformados em vapor aproveitável na fábrica. Com adição de macro e micronutrientes, o grau de transformação biológica do soro para biogás pode atingir 95-97%. A redução significativa da carga poluente no soro tratado permitirá a sua recepção na estação de tratamento de águas residuais industriais existente, sem que esta necessite de ampliação ou remodelação.

**Palavras-chave:** Indústria Láctea, Soro Lácteo, Digestão Anaeróbia, Biogás, Reactor UASB.

### Abstract

A small cheese factory in northern Portugal, producing 10 m<sup>3</sup>/d of whey with a potential pollution equivalent sewage generated from 4200 inhabitants, had been financed by MAPE, based on a special program PRIME to construct an anaerobic digestion treatment system to generate bio-energy for internal consumption. The system, designed according to the concept of ECP, includes integration of the existing facilities, utilization of material suitable for the local environment and the nature of service, and optimization of the operation and safety. The two reactors in series serve for the two distinct phases of anaerobic digestion that convert whey to organic acids and then to methane. 4010 MJ/d of bio-energy can be produced, from which, in winter, 76% is transferred to water vapour for use in the factory. The reduction of organic load allows the existing industrial effluent treatment plant to accept the digested whey without significant modification or resizing.

**Keywords:** Dairy Industry, Whey, Anaerobic Digestion, Biogas, UASB Reactor.

## 1. Introdução

A indústria alimentar é caracterizada pela produção de subprodutos com elevado conteúdo de material orgânico facilmente biodegradável que, por um lado, são fontes de energia mas, por outro, fontes de poluição.

A indústria láctea em Portugal, nomeadamente a produção de iogurte, leite para consumo e queijo, é responsável por um elevado potencial de poluição orgânica. O soro, um subproduto da produção de queijo, que contém elevada quantidade de material orgânico, ou seja, energia, é tradicionalmente aproveitado como suplemento alimentar de animais ou rejeitado como efluente industrial. Recentemente, o soro é transformado em produtos de elevado valor acrescido nas indústrias de fermentação, de produtos farmacêuticos e cosméticos.

Investigações mais recentes (Hutchinson *et al.*, 2003) são dirigidas para a produção, a partir de soro, de filmes especiais para conservação de alimentos contra a oxidação.

A produção de leite em Portugal Continental em 2005 era de 1 200 000 m<sup>3</sup>, sendo 35% destinado à produção de queijo curado, resultando 372 000 m<sup>3</sup> de soro (Castanheira *et al.*, 2006). Sem o tratamento adequado, o soro não aproveitado corresponde à potência poluente de 543 500 habitantes.

Em Portugal continental, cerca de 60% do soro produzido é aproveitado para produção de soro concentrado ou soro em pó, através de filtração por membrana ou secagem a baixa temperatura, respectivamente.

Ambas as tecnologias exigem um elevado investimento inicial e um alto custo de exploração, o que se torna viável apenas para uma instalação de grande dimensão.

Para as pequenas queijarias, as opções disponíveis relativas ao soro incluem:

1. envio às grandes instalações para valorização;
2. oferta a vizinhos lavradores para suplemento da alimentação dos animais;
3. aproveitamento em instalações próprias.

Uma vez que o soro contém cerca de 95% de água, o envio para uma grande instalação de valorização é viável quando o custo do transporte compensa o custo de outra opção.

Em Portugal, existem apenas duas unidades lácteas, nomeadamente a Lactogal em Leça do Balio e a Lacto Ibérica em Vale de Cambra, que possuem instalações de desidratação a frio (liofilização) tendo uma capacidade total de produção de 6 000 toneladas/ano de soro em pó (Frazão, 2001).

Como é evidente, este tipo de aproveitamento e valorização com elevado investimento e tecnologia sofisticada é limitado a um pequeno número de queijarias.

A opção de utilização directa como suplemento de alimento para animais é económica, uma vez que o soro é oferecido sem qualquer custo para a queijaria (Boxer, 1976). Contudo, a recepção do soro por lavradores não é certa, tanto em quantidade como em frequência, o que impõe restrições na gestão dos resíduos, correndo-se o risco de violar os limites legais da qualidade ambiental.

## 2. Soro

Na produção de queijo, após a coagulação do leite, o soro é removido como subproduto, com uma produção específica de 0,9 kg/kg leite. Tradicionalmente, o soro é aproveitado como suplemento alimentar de animais. Contudo, a industrialização do sector dos lacticínios eliminou praticamente a "recirculação directa" de soro devido à sua composição (Quadro 1), que é caracterizada pela elevada quantidade de água, prejudicando o custo de transporte e o seu manuseamento.

Quadro 1. Composição do soro (em % peso, excepto pH).

Constituinte	Soro doce	Soro ácido
Água	93 - 94	94 - 95
Material seco	6,0 - 6,5	5,0 - 6,0
Lactose	4,5 - 5,0	3,8 - 4,3
Ácido láctico	vestígio	< 0,8
Proteína crua	0,8 - 1,0	0,8 - 1,0
Proteínas de soro	0,60 - 0,65	0,60 - 0,65
Ácido cítrico	0,1	0,1
Gordura	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5
Minerais	0,5 - 0,7	0,5 - 0,7
pH	6,4 - 6,2	5,0 - 4,6

Sem recuperação, a reutilização ou tratamento do soro torna-se uma fonte poluente muito forte, correspondendo a 100 vezes o esgoto doméstico em termos de concentrações de material orgânico biodegradável (Quadro 2).

Consequentemente, o soro é desidratado e utilizado na indústria alimentar, em produtos químicos, farmacêuticos e cosméticos.

Outros aproveitamentos com alto valor comercial acrescido incluem a produção de culturas microbianas e a produção de filmes especiais para protecção de alimentos contra a oxidação química e a contaminação bacteriana.

Quadro 2. Potencial poluente do soro lácteo.

Parâmetro	Valor
Sólidos dissolvidos, g/l	50 - 80
Carência química de oxigénio, g/l	55 - 70
Carência bioquímica de oxigénio, g/l	35 - 45
Azoto total de Kjeldahl, mg/l	750 - 1000
Fósforo total, mg/l	80 - 100

Todas as hipóteses de aproveitamento de soro são sempre condicionadas pelos seguintes factores:

- Custo de transporte;
- Dimensão da empresa;
- Mercado para o produto da transformação;
- Regulamento legal.

Em Portugal, as pequenas indústrias lácteas, especialmente as queijarias, encontram várias dificuldades relativamente à rejeição do soro, as quais gradualmente se transformam numa ameaça real à existência deste tipo de indústria tradicional. Esta situação está, de certo modo, agravada pela exigência de redução da emissão de gases com efeito de estufa estipulada pelo Protocolo de Quioto, discutido e negociado em 1997 e ratificado em 1999. A emissão de poluentes da indústria láctea em Portugal é principalmente atribuída à produção de queijo (Quadro 3). Devido à sua dimensão e localização, para uma pequena queijaria portuguesa, as soluções para a rejeição de soro não podem ser as mencionadas anteriormente, mas sim uma que elimine a necessidade de transporte com o aproveitamento máximo através de tecnologia de transformação ecológica e económica.

Quadro 3. Emissão de poluentes na indústria láctea Portuguesa (Castanheira *et al.*, 2006).

Parâmetro	Iogurte	Leite	Queijo
Distribuição de leite cru:			
(%)	6	59	35
(tonelada/ano)	72 000	708 000	420 000
Emissão (tonelada/ano):			
NH <sub>3</sub>	720	4950	7370
CO <sub>2</sub>	100 000	330 000	694 000
CH <sub>4</sub>	3500	22 000	32 400
NO <sub>x</sub>	400	1760	2760
SO <sub>x</sub>	720	1450	3300
CQO	5000	41 000	68 100
NO <sub>3</sub>	4 100	32 000	47 900

## 3. O Caso de uma Queijaria Minhota

A queijaria Minhota em questão é uma unidade industrial tradicional Portuguesa de pequena dimensão, com uma exploração familiar, tendo um consumo anual de leite cru de 2500 m<sup>3</sup>/ano, do qual são produzidos 187 500 kg/ano de queijo e 7 - 10 m<sup>3</sup>/d de soro. A rejeição do soro corresponde a uma carga de carência bioquímica de oxigénio (CBO) de 265 kg/d ou a uma carga poluente de 4400 habitantes.

Existem as seguintes opções para a deposição do soro da queijaria:

1. Oferta aos vizinhos lavradores para alimentação dos animais: pouca quantidade e irregular;
2. Envio à Lactogal em Leça do Balio, Matosinhos, para secagem: sujeito às condições de funcionamento da empresa grande (irregular, obriga à compra de leite) e elevado custo de transporte;
3. Secagem própria: elevados custos de instalação e exploração, comercialização incerta do produto;
4. Rejeição para a ETEI (Estação de Tratamento de Efluente Industrial) própria: limitada pela capacidade existente de tratamento;
5. Produção de energia, através de digestão anaeróbia, para consumo interno.

De modo a garantir uma gestão mais adequada e auto-controlável do soro produzido, as opções viáveis para a queijaria são a (4) e a (5). A ETEI existente na Queijaria foi construída para uma carga poluente equivalente à de uma população de apenas 400 habitantes. Assim, sem uma redução significativa da carga orgânica do soro, a ETEI deveria ser ampliada para uma capacidade equivalente de 5000 habitantes, a qual não é viável tanto no aspecto técnico como no económico.

Consequentemente, a opção mais vantajosa é o aproveitamento do soro como uma fonte alternativa de energia, tendo em conta que os processos naturais de aproveitamento, i.e., a fermentação anaeróbia, do soro são favorecidos pela Queijaria, podendo-se evitar o controlo pela grande empresa concorrente.

Na Queijaria, o consumo de fuelóleo para geração de vapor destinado à pasteurização e limpeza é de 42 500 kg/ano e o consumo de energia eléctrica de 226 000 kWh/ano (ambos os valores relativos ao ano 2006). Considerando uma eficácia aceitável de conversão do material orgânico biodegradável no soro de 90% em termos de CQO (carência química de oxigénio), uma produção unitária de 0,34 m<sup>3</sup>/kg CQO removida e uma concentração de metano no biogás de 65%, a produção de biogás é da ordem dos 190 m<sup>3</sup>/d.

O processo de digestão anaeróbia para o soro em questão inclui duas etapas distintas de fermentação: conversão de material orgânico para ácidos orgânicos e transformação dos ácidos para metano e dióxido de carbono, sendo o soro digerido descarregado para a ETEI e sujeito novamente a tratamento. A etapa de acidificação, que é um processo facultativo, é realizado num tanque existente em aço inoxidável para armazenamento de soro, com um volume útil de 30 m<sup>3</sup> e um tempo de retenção hidráulica de quatro dias, que serve também como um tanque de regularização de caudal de alimentação ao reactor da etapa a jusante.

A 2.ª etapa de fermentação é realizada num reactor anaeróbio mesofílico com 45 m<sup>3</sup> de volume, do tipo UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*), também de construção em aço inoxidável, tendo uma carga orgânica de 8 kg CQO/m<sup>3</sup>/d e um tempo de retenção hidráulica de 5,5 dias. O reactor está equipado com uma camada exterior de isolamento térmico e um sistema de aquecimento exterior para manter uma temperatura constante de 30 - 35 °C.

Para uma temperatura ambiental média mais desfavorável de 12 °C, o reactor exige um fluxo de calor de 740 MJ/d. No Verão a 18 °C, o consumo de calor de manutenção reduz-se para apenas 535 MJ/d. A energia aproveitada para geração de vapor é de 4010 MJ/d, correspondente a 33 500 kg/ano de fuelóleo, que é equivalente a 76% do consumo do ano 2005. O aproveitamento energético é condicionado pelo armazenamento do biogás produzido, uma vez que o regime de geração de vapor na queijaria é apenas de 11 horas/dia e de 5 dias/semana, enquanto o funcionamento do reactor UASB é contínuo. Na optimização da capacidade de armazenamento de biogás foram considerados factores tais como a pressão de armazenamento (5,5 bar), a temperatura atmosférica mais elevada (40 °C) e a área e o espaço disponíveis na queijaria.

Na Figura 1 apresenta-se a simulação da flutuação de caudal de gás disponível para aproveitamento durante um período de um mês. Assim, dimensionou-se um gasómetro pressurizado com um volume de 24 m<sup>3</sup>, o qual no Verão não é suficiente para armazenar todo o biogás em excesso acumulado, sendo que uma perda de apenas 1% da produção, pode ser queimada através de um queimador de emergência (*flare*).

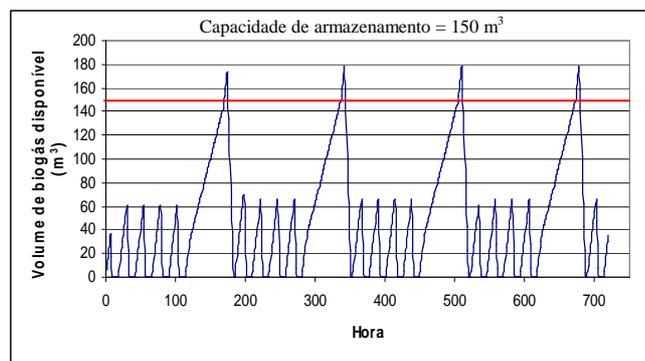


Figura 1. Simulação de volume de biogás disponível

Para geração de vapor, instalou-se uma caldeira do tipo vertical com uma capacidade máxima de 120 kg/h a 100 °C e a 8,5 bar, equipado com um queimador “*dual-fuel*” que consome cerca de 10 m<sup>3</sup>/h de biogás ou 9 l/h de fuelóleo.

O condensado de vapor, com uma temperatura mínima da ordem dos 70 °C, é utilizado como alimento do sistema de aquecimento do reactor UASB, através dum permutador térmico do tipo tubo duplo de 3 m de comprimento, com diâmetros de 40/60 mm (tubo interior/exterior). A temperatura do condensador na saída do permutador é de 45 °C e é aumentada até 65 °C, após a recuperação do calor da exaustão da caldeira. Para a análise económica consideram-se os seguintes dados relativos ao consumo de fuelóleo na Queijaria, no ano de 2005:

1. Consumo médio de fuelóleo: 171 kg/d;
2. Valor energético de fuelóleo: 43,7 MJ/kg;
3. Número de dias de laboração: 248 dias/ano;
4. Preço de fuelóleo: 396 €/tonelada.

No Quadro 4 apresenta-se um resumo da comparação da valorização do biogás produzido, em termos de fuelóleo equivalente e também em termos monetários, calculada para as situações de Inverno e Verão.

Em média, o biogás produzido pode substituir cerca de 60% da energia para geração de vapor necessário na Queijaria.

Quadro 4. Análise económica.

Item	Inverno	Verão
Energia disponível no vapor, MJ/d	3110	3360
Fuelóleo equivalente à energia disponível, kg/d	96	105
Fuelóleo necessário, kg/d	75	66
Poupança de fuelóleo, €/ano	9460	10 340

Na Figura 2 apresenta-se o balanço energético global na ETEI, relativo ao consumo de energia eléctrica para o funcionamento do sistema de tratamento de soro, à produção de biogás e ao seu aproveitamento na época mais desfavorável (Inverno) quando o consumo de energia para o aquecimento do reactor é mais elevado.

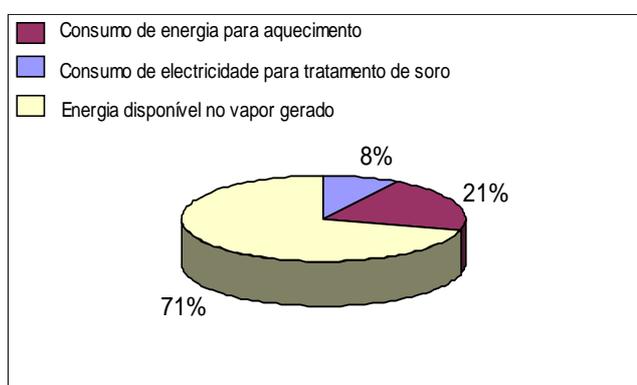


Figura 2. Balanço energético na ETEI (Inverno).

De acordo com o balanço energético apresentado na figura anterior, podem-se discriminar as seguintes parcelas de aproveitamento:

1. energia disponível no vapor gerado: 3110 MJ/d;
2. consumo de energia térmica para manutenção da temperatura do reactor USAB, incluindo perda: 910 MJ/d no Inverno e 650 MJ/d no Verão;
3. consumo de energia eléctrica para o sistema anaeróbio de tratamento de soro: 370 MJ/d.

Após o tratamento por digestão anaeróbia, o soro é conduzido para a ETEI existente onde, conjuntamente com os efluentes industriais, é sujeito ao tratamento biológico aeróbio por lamas activadas e ao tratamento físico-químico, para remoção de fósforo por precipitação com adição de sulfato de alumínio. O aumento da carga orgânica na ETEI, devido à introdução do soro, é inferior a 10% em termos de CQO.

Uma vez que o processo de tratamento anaeróbio é caracterizado por um baixo consumo de energia eléctrica e produção muito reduzida de lamas biológicas, a necessidade de mão-de-obra é insignificante, sendo o custo total de exploração da ordem de 11 725 €/ano dividido nas parcelas apresentadas na Figura 3.

Admitindo que a poupança em média de fuelóleo é de 9900 €/ano (ver Quadro 4), o aproveitamento unitário devido à geração e utilização de biogás é de 5,62 €/m<sup>3</sup> de soro.

Comparando com o custo unitário de rejeição de soro, na Lactogal em Leça do Balio, de 13,71 €/m<sup>3</sup>, a solução que resolve o problema de deposição de soro da Queijaria é claramente positiva.

No Quadro 5 resumem-se os custos anuais associados com o tratamento completo do soro. O custo unitário calculado de tratamento é de 6,66 €/m<sup>3</sup> de soro.

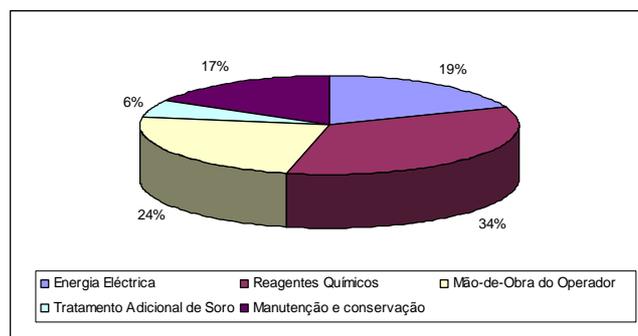


Figura 3. Distribuição do custo de exploração.

Quadro 5. Custos anuais de tratamento completo de soro

Item	Custo (€/ano)
Energia eléctrica	2245
Reagentes químicos	4025
Mão-de-obra do operador	2805
Tratamento adicional de soro e lama	695
Manutenção e conservação	1955
TOTAL	11 725

Para a realização do processo de tratamento anaeróbio, incluindo o aproveitamento de biogás e a remodelação da ETAR existente, o investimento inicial foi arredondado para 160 000 €, sendo 85% para equipamento e automação, 8% para construção civil e o restante para trabalho administrativo e assistência técnica.

Cerca de 20% do investimento foi financiado a fundo perdido pelo programa MAPE (Medida de Apoio ao Aproveitamento do Potencial Energético e Racionalização de Consumos).

A ETEI foi projectada de acordo com a concepção de ECP (*Environmentally Conscientious Product*), utilizando materiais que exigem uma manutenção mínima contra os efeitos adversos da atmosfera costeira e, ao mesmo tempo, conservam o calor necessário para o bom funcionamento do processo de digestão anaeróbia.

#### 4. Conclusão

Embora existam vários processos de aproveitamento de soro lácteo, a selecção de uma solução óptima para o problema ambiental da Queijaria baseou-se principalmente no estudo energético, tendo em conta o elevado conteúdo de material orgânico biodegradável no soro, o que permite a geração de biogás através dum processo natural de baixa tecnologia com alto rendimento e robusta estabilidade.

Para uma produção de 7 – 10 m<sup>3</sup>/d de soro, um sistema de digestão anaeróbia é capaz de gerar 4010 MJ/d de energia, o que elimina a necessidade de transporte de soro para o exterior e, ao mesmo tempo, é suficiente para manter o funcionamento mesofílico do digestor e substituir 60% do combustível fóssil consumido para geração de vapor.

Considerando o aumento significativo do preço da energia fósil nestes dois últimos anos, o investimento para resolver o problema do soro é muito vantajoso.

Em termos de protecção ambiental, a diminuição do consumo de fuelóleo reduz a emissão de CO<sub>2</sub> em 107 toneladas/ano, enquanto que o sistema de digestão e aproveitamento emite 124 toneladas/ano, 86% das quais são originadas na utilização do biogás.

A solução adoptada para rejeição do soro resulta num "footprint" de CO<sub>2</sub> de apenas 31 toneladas/ano. A elevada eficácia de remoção da carga orgânica por digestão anaeróbia permite a descarga do soro digerido na ETEI existente, para tratamento adicional, sem ampliação mas com introdução duma etapa de remoção de nutriente, de acordo com a nova exigência legal.

## 5. Referências

- Boxer, S. (1976). *Elimination of Pollution from Cottage Cheese Whey by Drying and Utilization*, EPA-600/2-76-254, Industrial Environmental Research Laboratory, EPA, USA.
- Castanheira, É. G., Dias, A. C., Ferreira A. J. D., Pereira, C. J. D., Arroja, L. (2006). Avaliação do impacte ambiental do sector dos Lacticínios em Portugal, 9.º Congresso Nacional do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Hutchinson, F. M., J. V. Balagtas, J. M. Krochta, D. A. Sumnerl (2003). Potential gains to producers from new uses for whey, *AIC Issues Brief*, N.º 2, February, Agricultural Issues Center, University of California, USA.
- Nuno Frazão (2001). *Estudo de Mercado do Soro Lácteo em Portugal*, Associação Nacional dos Industriais de Lacticínios, Porto, Portugal.

## Agradecimentos

À empresa Lacticínios das Marinhas, Lda., o autor agradece a autorização para utilização dos seus dados e do projecto da ETEI.