

## ESTUDO DO CONSUMO ENERGÉTICO COM REAPROVEITAMENTO DE CORRENTES EM INDÚSTRIA DE LEITE CONDENSADO

**Camille D. P. BENEDITO<sup>1</sup>; Ezequiel M. M. COUTINHO<sup>2</sup>; Kathryn N. G. DE PAULA<sup>3</sup>;  
Mateus O. PEREIRA<sup>4</sup>**

### RESUMO

Este trabalho teve como objetivo adaptar um processo de produção de leite em pó em um processo de leite condensado, ambos integrais, utilizando o software DWSIM, com base no projeto proposto por Silva (2020). O processo foi modelado com adaptações estratégicas, incluindo a substituição de equipamentos não disponíveis no software por alternativas funcionais e a implementação de sistemas de recuperação de energia. A análise comparativa demonstrou que a configuração proposta apresenta vantagens significativas em termos de eficiência energética quando comparada a processos convencionais. Embora os resultados sejam promissores, ressalta-se a necessidade de validação experimental, particularmente no que diz respeito ao controle de cristalização do produto final. O trabalho contribui para o desenvolvimento de simulações mais precisas na indústria de laticínios, destacando o potencial de otimização de processos por meio de ferramentas computacionais.

**Palavras-chave:** DWSIM; Simulação de Processos; Eficiência Energética; Indústria de Laticínios.

### 1. INTRODUÇÃO

O Brasil detém o título de maior consumidor mundial de leite condensado, consumo que ultrapassa a casa de 200 mil toneladas por ano (Dias, s.d.). Seu processo produtivo envolve etapas como concentração por evaporação, adição de sacarose e controle rigoroso dos parâmetros operacionais, sendo, portanto intensivo em consumo energético (Vargas *et al.*, 2020).

Diante da crescente demanda, torna-se essencial otimizar os processos produtivos. A simulação computacional com o software DWSIM permite modelar processos industriais com maior precisão, analisando variáveis operacionais, balanços de massa e energia, e identificando oportunidades de eficiência.

Os objetivos deste trabalho foram simular, no software DWSIM, o processo de obtenção do leite condensado como alternativa ao COCO, e adaptar um arranjo originalmente voltado à produção de leite em pó integral, conforme Silva (2020). O modelo inclui regenerador de calor, etapas de pasteurização, evaporador, misturador com sacarose e outros componentes. Após os ajustes, realizou-se uma análise comparativa do consumo energético entre os dois arranjos, a fim de quantificar a energia gasta ou poupada ao adaptar o processo para a produção do leite condensado integral.

<sup>1</sup>Aluna, IFSULDEMINAS - Campus Pouso Alegre. E-mail: [camille.benedito@alunos.if sulde minas.edu.br](mailto:camille.benedito@alunos.if sulde minas.edu.br);

<sup>2</sup>Aluno, IFSULDEMINAS - Campus Pouso Alegre. E-mail: [ezequiel.mamedes@alunos.if sulde minas.edu.br](mailto:ezequiel.mamedes@alunos.if sulde minas.edu.br);

<sup>3</sup>Aluna, IFSULDEMINAS - Campus Pouso Alegre. E-mail: [kathryn.paula@alunos.if sulde minas.edu.br](mailto:kathryn.paula@alunos.if sulde minas.edu.br);

<sup>4</sup>Aluno, IFSULDEMINAS - Campus Pouso Alegre. E-mail: [mateus1.pereira@alunos.if sulde minas.edu.br](mailto:mateus1.pereira@alunos.if sulde minas.edu.br).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a simulação foi escolhido o software DWSIM, devido à sua baixa complexidade de utilização, e apesar de ser gratuito, possui os principais equipamentos necessários, o que o torna satisfatório para o processo desejado.

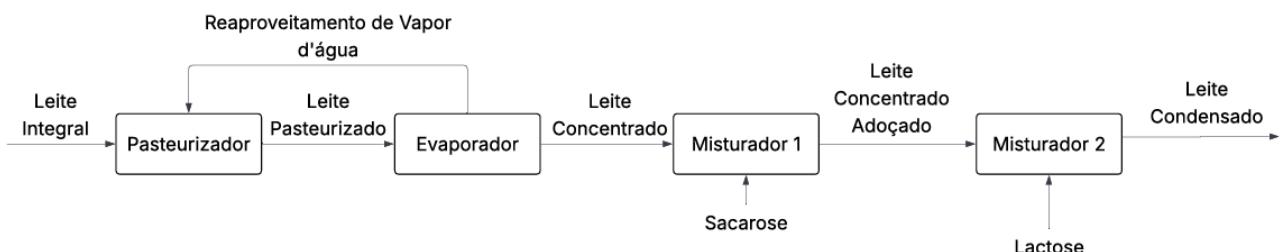
### 2.1 Biblioteca de componentes

Como o leite não faz parte da biblioteca padrão do DWSIM, seria necessário adicionar manualmente suas propriedades físico-químicas, o que demandaria um esforço considerável. Então após uma série de pesquisas, optou-se por importar seus pseudocomponentes de uma biblioteca externa, específica de compostos alimentícios como alternativa: a base de dados FoodProp, elaborada por Spogis (2021).

### 2.2 Adaptação dos componentes e equipamentos

Para representar a corrente de leite, foram utilizados pseudocomponentes como lactose, caseína, água, trioleína e NaCl, com base nas proporções do estudo de Silva (2020). Também foram feitas adaptações nos equipamentos, substituindo o pasteurizador e o regenerador por trocadores de calor, já que essas unidades não estão disponíveis no DWSIM. Além disso, optou-se pelo reaproveitamento do vapor do evaporador, visando maior eficiência. Ao final, elaborou-se um fluxograma geral do processo de produção de leite condensado, Figura 1:

**Figura 1: Fluxograma geral do processo de produção de leite condensado**



Fonte : Elaborado pelos autores (2025).

### 2.3 Construção da Simulação

Inicialmente, o leite armazenado ( $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $5\text{ atm}$ ) foi pré-aquecido a  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  em regenerador, utilizando o retorno de leite aquecido, reduzindo a necessidade de energia externa. Após a pasteurização, o leite foi resfriado a  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por meio de água resfriada ( $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), reaproveitando correntes do processo.

Em seguida, ocorreu concentração em evaporador sob vácuo ( $16\text{ kPa}$ ), elevando a temperatura até  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com retirada de vapor ( $580,41\text{ kW}$ ). O vapor foi recuperado, superaquecido a  $99\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $16\text{ kPa}$ ;  $13,2\text{ kW}$ ) e reintegrado ao ciclo para aquecimento de leite, fechando o ciclo térmico.

O leite concentrado foi misturado com xarope de sacarose a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , onde se obteve um

produto adoçado com uma temperatura final de 65,8 °C. Em seguida, este adoçado foi resfriado a, aproximadamente, 32 °C com água reciclada da pasteurização, garantindo recuperação energética.

Na etapa seguinte, aplicou-se uma simulação do que seria o processo de “seeding”, com adição de lactose a 25 °C, a fim de promover nucleação controlada e melhorar a textura do produto.

Por fim, o leite condensado foi bombeado até 5 atm, com ligeiro aumento de temperatura (de 32 °C para 32,08 °C) e consumo energético estimado em 0,04 kW, otimizando as condições de preenchimento e embalagem.

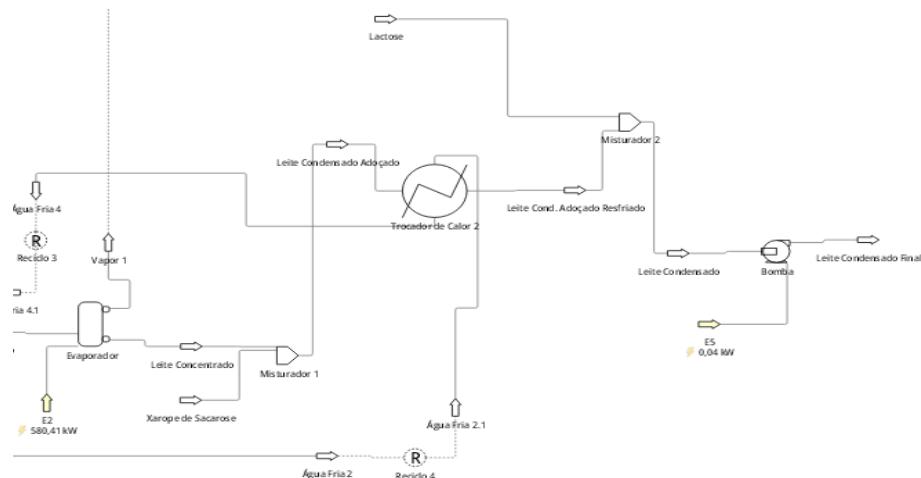
A integração de regeneração térmica, evaporação sob vácuo, reaproveitamento de vapor e água, associada ao “seeding” simulado, evidencia uma proposta de processo eficiente e com potencial aplicação industrial, embora foram necessárias validações experimentais do controle cristalino.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa mostra que, na produção de leite condensado com regenerador, a energia total fornecida, soma do evaporador (580,41 kW), pasteurizador (12,93 kW) e bomba (0,04 kW); atinge 593,38 kW. Isso corresponde a um consumo específico de 2,49 kWh/kg para a vazão de 238,43 kg/h de produto final. Em comparação, o processo de produção de leite em pó integral com regenerador, descrito por Silva (2020), apresenta 4,30 kWh/kg, o que indica melhoria de cerca de 42% na eficiência energética.

Esse desempenho encontra respaldo na literatura, que aponta valores entre 0,075 e 0,375 kWh/kg de água evaporada em sistemas de múltiplos efeitos com regenerador, MVR ou TVR. Já a etapa de secagem por “spray dryer”, comum no leite em pó, representa o maior gasto energético, podendo variar de 6 a 8 kWh/kg de produto. Um trecho do processo final pode ser observado na Figura 2:

**Figura 2: Representação da secção final do processo**



Fonte : Elaborado pelos autores (2025).

Dessa forma, mesmo com um sistema mais simples, o processo de produção de leite condensado com regenerador demonstra ser energeticamente mais eficiente que a rota de leite em pó com regenerador, e seus resultados estão alinhados com os valores de referência encontrados na literatura da área.

A Tabela 1 apresenta os dados de consumo energético dos dois processos simulados. Nota-se que o processo de leite condensado consome 2,49 kWh/kg, valor 42% inferior ao do processo de leite em pó (4,30 kWh/kg). Isso reforça a vantagem da rota com regenerador, mesmo em um modelo simplificado. Os valores obtidos estão de acordo com a literatura técnica, que aponta menor consumo em processos com múltiplos efeitos e reaproveitamento de vapor.

**Tabela 1: Comparativo de resultados obtidos**

Processo	Vazão(kg/h)	Energia Total (Kw)	Consumo específico (Kwh/kg)
<b>Leite em Pó - Silva (2020)</b>	<b>128,0</b>	<b>550,4</b>	<b>4,30</b>
<b>Leite Condensado - Este Estudo</b>	<b>238,43</b>	<b>593,38</b>	<b>2,49</b>

Fonte : Elaborado pelos autores (2025).

#### **4. CONCLUSÃO**

A simulação do processo de leite condensado no DWSIM demonstrou maior eficiência energética em relação à rota de leite em pó com regenerador. Com consumo específico 42% menor, o modelo destaca-se como alternativa viável e alinhada aos dados técnicos disponíveis, evidenciando o potencial da simulação na otimização de processos industriais.

#### **REFERÊNCIAS**

DIAS, Diogo Lopes. **Como é feito o leite condensado?** Mundo Educação (UOL Educação). Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/leite-condensado.htm>. Acesso em: 20 jun. 2025.

SILVA, Solange Souza Vieira. **Simulação Do Processo Produtivo De Leite Em Pó Utilizando Um Software Gratuito.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - IFSULDEMINAS, Pouso Alegre, 2020.

SPOGIS. **FoodProp Database.** 2021. Disponível em: <https://github.com/Spogis/DWSIMFoodProp>. Acesso em: 18 jun. 2025.

VARGAS, G. D. et al. **Eficiência energética na produção de leite condensado: uma revisão crítica.** Revista Brasileira de Laticínios, v. 5, n. 1, p. 33–42, 2020.