

CAMPO ELÉTRICO PULSADO: POTENCIALIDADES E DESAFIOS PARA MELHORAR A SAUDABILIDADE E SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

Rodrigo N. Cavalcanti¹, Ramon Silva², Mônica Q. Freitas¹, Adriano G. Cruz²

¹ Universidade Federal Fluminense (UFF), Faculdade de Medicina Veterinária ² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro (IFRJ), Departamento de Alimentos,

Contato: rodrigoncavalcanti@gmail.com



O campo elétrico pulsado é uma alternativa sustentável na conservação de laticínios, garantindo alta qualidade nutricional, sensorial e funcional, minimizando impactos ambientais.

Introdução

O campo elétrico pulsado (CEP) é uma tecnologia não térmica que se destaca na indústria alimentícia pelos seus critérios de sustentabilidade, reduzindo custos, consumo de energia e desperdício, enquanto melhora a qualidade dos produtos (Arshad et al., 2021). Apesar de superar métodos térmicos em eficiência energética e preservação de características dos alimentos, o CEP enfrenta desafios como custos de instalação e complexidades na compreensão dos parâmetros de processo (Djukić-Vuković et al., 2021). Reconhecido por sua eficácia na inativação microbiana em sucos, ovos líquidos, leite e produtos lácteos, o CEP é uma técnica versátil capaz de ser aplicada em outros métodos de processamento de alimentos (Priyadarshini, A., et al., 2019)

Princípios e Parâmetros Operacionais

O CEP consiste em uma tecnologia não térmica que se fundamenta na aplicação direta de pulsos elétricos de alta intensidade ($E = 0.5-80 \text{ kV/cm}$), em intervalos de tempo de curtíssima duração (micro- a nanossegundos), e com relativo baixo uso de energia ou trabalho ($W_T = 0.1-150 \text{ kJ/kg}$). Normalmente a aplicação ocorre inserindo o alimento entre dois eletrodos de uma câmara de tratamento. Em geral, os sistemas de CEP são compostos por uma fonte de alimentação de alta voltagem, um gerador de pulsos, um interruptor de descarga de energia conectado aos eletrodos, uma câmara de tratamento, um osciloscópio, um trocador de calor de resfriamento, e um sistema de controle e monitoramento (Figura 1). A câmara de tratamento consiste em dois eletrodos mantidos por um componente isolante, cercado o material alimentar. Em sistemas em batelada, os eletrodos são

retangulares ou circulares e paralelos, enquanto em sistemas contínuos, são tubulares e dispostos em design coaxial ou colinear (Cavalcanti et al., 2023).

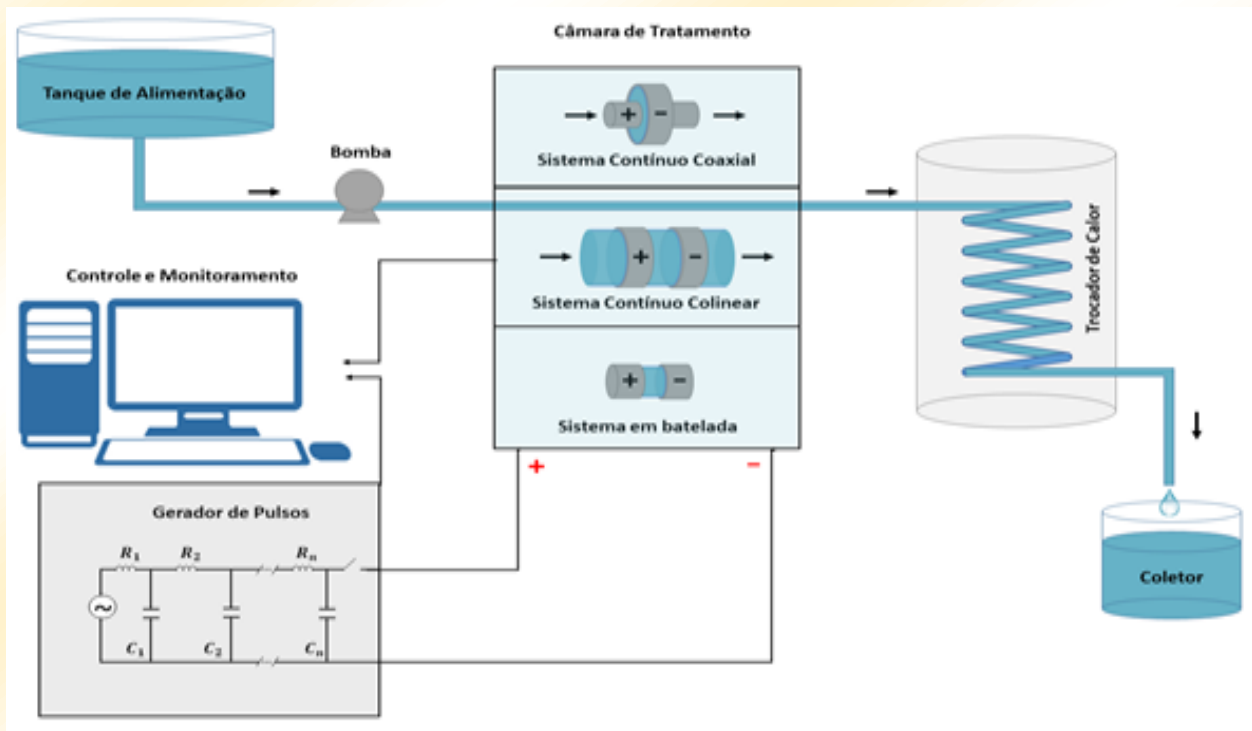


Figura 1. Sistemas de tratamento (batelada e contínuo) utilizando campo elétrico pulsado (Cavalcante et al., 2023)

Mecanismo de Ação

Os mecanismos por trás dos efeitos do CEP ainda não são totalmente compreendidos, mas a eletropermeabilização, também conhecida como eletroporação, da membrana celular é amplamente reconhecida como a causa mais provável da disruptura da membrana celular.

A eletroporação envolve a formação de poros na membrana celular devido ao acúmulo de cargas opostas nas superfícies interna e externa da membrana quando exposta a um campo elétrico. Esse fenômeno leva a um aumento no transporte de fluidos e moléculas através da membrana que, em certa medida, pode resultar na perda de material intracelular, perturbar funções celulares e, eventualmente, levar à destruição da célula (Alirezalu et al., 2020). O fenômeno da eletroporação pode ocorrer de forma reversível ou irreversível (Figura 2). A eletroporação reversível ocorre quando a intensidade do campo elétrico (E) é igual ou ligeiramente excede um valor crítico específico ($E \geq E_c$), causando permeabilização temporária da membrana celular. No entanto, esses poros eventualmente se fecharão, e a célula se recuperará. Por outro lado, a eletroporação irreversível ocorre quando a intensidade do campo elétrico à membrana celular excede um valor crítico específico ($E \gg E_c$), levando à ruptura da membrana, exsudação do conteúdo celular citoplasmático e eventual morte celular (Djukić-Vuković et al., 2021).

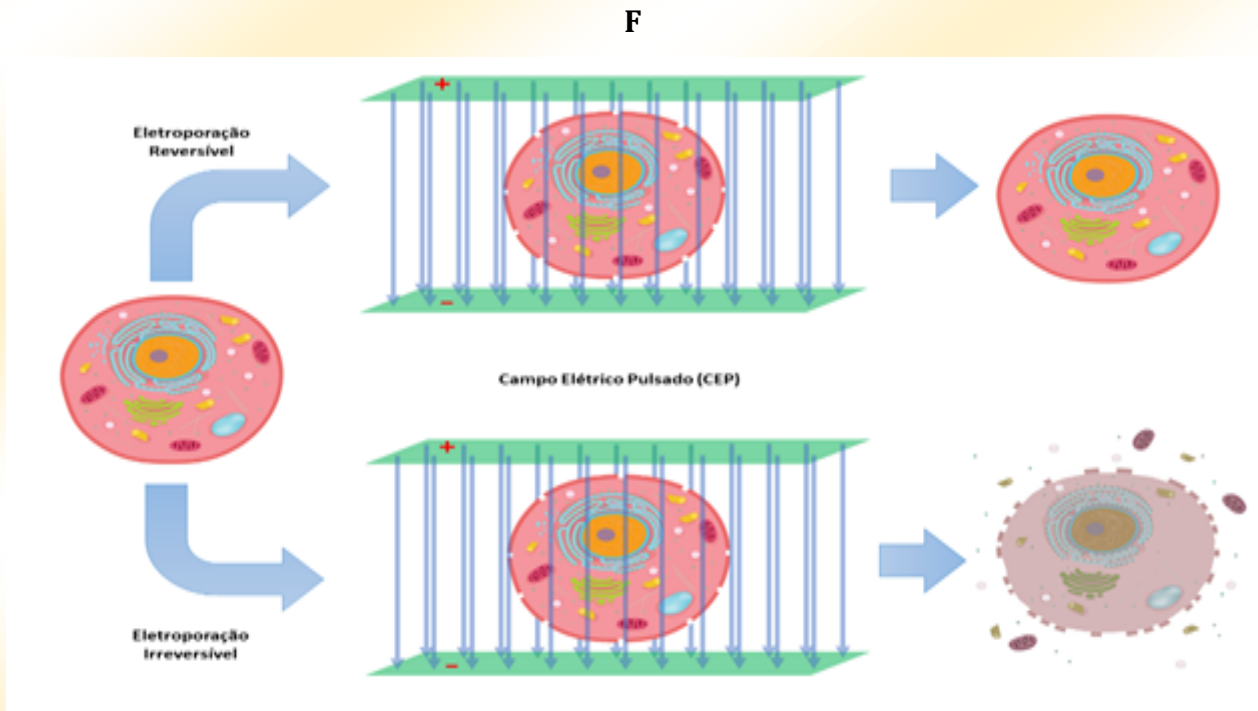


Figura 2. Eletroporação (reversível e irreversível) causado devido à ação do campo elétrico pulsado (Cavalcante et al., 2023)

Potencialidades e Benefícios

As potencialidades do CEP como técnica alternativa à pasteurização têm sido amplamente investigadas nas últimas seis décadas. Dependendo dos parâmetros de processo, essencialmente a intensidade do campo elétrico e a entrada total de energia, o CEP pode ser aplicado em várias áreas da indústria alimentícia: inativação de células microbianas em alimentos (pasteurização, 15–40 kV/cm até 1.000 kJ/kg), melhoria da transferência de massa em células vegetais ou animais (extração, secagem, desidratação osmótica, congelamento, descongelamento; 0,7–3,0 kV/cm até 1–20 kJ/kg), indução de resposta ao estresse para modificações estruturais na matriz alimentar (gelatinização, descascamento, corte; 0,5–1,5 kV/cm até 0,5–5 kJ/kg), eletropermeabilização reversível de células biológicas na área de biotecnologia (0,7 kV/cm até 1–10 kJ/kg), entre outros. (Alirezalu et al., 2020; Gómez-López et al., 2022).

Particularmente, os principais benefícios do CEP como técnica alternativa à pasteurização do leite e derivados, podem ser elencados em termos de sustentabilidade e saudabilidade (Arshad et al., 2021; Gómez-López et al., 2022), conforme listados abaixo:

- **Sustentabilidade:** Redução dos tempos de processamento e diminuição dos custos, Baixo consumo de energia e alta eficiência energética, Redução do uso de água: e Preservação Eficiente de produtos lácteos líquidos e semissólidos.
- **Saudabilidade:** Melhoria na Digestibilidade Proteica, Preservação Nutricional e Sensorial, Produção de Alimentos Funcionais Aprimorada e Redução de Aditivos Químicos.

Desafios e Limitações

Os principais desafios e limitações enfrentados nas aplicações do CEP residem na multiplicidade de fatores que podem impactar a inativação microbiana. Estes incluem os parâmetros do dispositivo CEP, como a intensidade do campo elétrico, a energia total aplicada, a frequência de repetição dos pulsos, a largura e forma dos pulsos, o número de pulsos, o tempo de tratamento e a temperatura. Além disso, fatores relacionados ao tipo de célula microbiana, como forma, tamanho, concentração, espessura da parede celular e fase de crescimento, bem como características do alimento, como condutividade elétrica, pH, atividade de água e concentração de soluções tratadas, também desempenham um papel crucial nesse processo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O campo elétrico pulsado (CEP) desponta como uma tecnologia promissora e sustentável na indústria de laticínios. Estudos indicam que o CEP, isoladamente ou combinado com outros métodos, pode aprimorar a inativação microbiana em leites e seus derivados. Vale ressaltar que a adoção do CEP resulta em uma redução expressiva na geração de resíduos industriais em comparação com técnicas tradicionais, promovendo uma produção mais limpa e eficiente. Adicionalmente, essa tecnologia destaca-se por sua eficiência energética, conservação de recursos hídricos e baixas emissões de gases poluentes, representando um avanço significativo em relação aos métodos de processamento térmico convencionais.

REFERÊNCIAS

- Alirezalu, K., Munekata, P. E. S., et al. (2020). Pulsed electric field and mild heating for milk processing: a review on recent advances. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100, 16–24
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, et al. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 111, 43–54.
- Cavalcanti, R. N., et al. (2023). Pulsed electric field-based technology for microbial inactivation in milk and dairy products. *Current Opinion in Food Science*, 54, 101087.
- Djukić-Vuković, A., et al. (2021). Pulsed electric field treatment of *Lactocaseibacillus rhamnosus* and *Lactocaseibacillus paracasei*, bacteria with probiotic potential. *LWT- Food Science and Technology* 152, 112304
- Fusco, V., et al. (2020). Microbial quality and safety of milk and milk products in the 21st century. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19, 2013–2049.
- Gómez-López, V. M., et al. (2022). Guidelines on reporting treatment conditions for emerging technologies in food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62, 5925–5949.
- Priyadarshini, A., et al. (2019). Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59, 3082–3101.
- Wang, L. H., et al. (2020). Mechanism of *Bacillus subtilis* spore inactivation induced by moderate electric fields. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 62, 102349

