

U.C:  
PROCESSAMENTO  
GERAL DE  
ALIMENTOS

A vibrant nebula with pink, purple, and blue filaments radiating from a central point, set against a black background. The nebula is partially obscured by a grey semi-transparent banner containing the title.

# PULSOS ELÉCTRICOS

**Elaborado por:**

Fabiana Oliveira nº20703064

Ana Ferreira nº20603055

Catarina Rodrigo nº20703030

Stéphanie Machado nº20803032

Diana Pereira nº20803020



# Índice

Introdução	Pág.3
Aspectos da engenharia dos PEF	Pág.4
Princípios do HACCP e tratamento com pulsos eléctricos	Pág.9
Pulsos eléctricos: utilização	Pág.12
Aplicações dos PEF's no processamento de alimentos	Pág.13
Desnaturação das proteínas	Pág.17
Conclusão	Pág.18
Bibliografia	Pág.19



# INTRODUÇÃO

O tema abordado é os pulsos eléctricos, um processo de conservação não térmico que permite a preservação de alimentos visto que estes podem sofrer deterioração dependendo da sua composição, processamento, embalagem e armazenamento. Apesar de ter sido um tratamento implementado em 1960, apenas recentemente se efectuaram desenvolvimentos tecnológicos, levando a um maior interesse sobre o uso de tal técnica.

O processo de PEF consiste na aplicação de pulsos eléctricos de alta tensão, entre 20-80 kV/cm, nos alimentos situados entre dois eléctrodos. A duração deste tratamento é cerca de 1segundo a temperatura ambiente ou pouco mais acima desta e assim minimizam-se as perdas de energia provocada pelo aquecimento dos alimentos. Esta tecnologia permite, assim, reduzir e evitar mudanças, que podem ser prejudiciais, das propriedades físicas e organolépticas dos alimentos ao contrário do que acontece com os tratamentos tradicionais. Certas vantagens da utilização de pulsos eléctricos consistem em permitir a geração de intensidades elevadas de campo eléctrico; as características das câmaras utilizadas dão um tratamento uniforme aos alimentos e ocorre uma minimização de electrólise devido às propriedades dos eléctrodos.



# ASPECTOS DE ENGENHARIA DOS PEF

O conceito de potência pulsada consiste no seguinte: a energia eléctrica, em níveis de baixa potência, é colectada durante um prolongado período e armazenada num capacitor. A energia armazenada pode ser descarregada quase instantaneamente em níveis de energia muito elevados. A geração de PEF's requer dois dispositivos principais que são a fonte de energia pulsante e uma câmara de tratamento que converte a tensão pulsante em PEF's.

- Unidade de bancada

O electroporador comercial (GeneZapper, etc...) pode ser usado como uma bancada e tal prevê um número máximo de 2,5kV de pulso. Este instrumento consiste num capacitor, interruptores de carga e descarga e um controlador de onda. O controlador de onda pode ser conectado a um electroporador para melhorar o padrão de quitação. A voltagem e os monitores de correntes devem ser adequados no GeneZapper para medir os tratamentos de PEF's. Esta unidade de bancada superior fornece um método conveniente para determinar a cinética de inactivação para microrganismos seleccionados.

- Escala laboratorial

O decaimento exponencial de pulsos eléctricos pode ser gerados pela descarga de um capacitor numa câmara que contem alimentos e as actuais fontes de alimentação são capazes de fornecer até 40kV. Os capacitadores são usados para armazenar a energia eléctrica que é descarregada através de eléctrodos de metal levando a uma criação de um campo eléctrico usado para a inactivação das enzimas e de microrganismos. A corrente pode ser controlada por uma bobina de Rogowski conectado a um integrador passivo



apesar da corrente poder ser controlada como a tensão através de um osciloscópio digital.

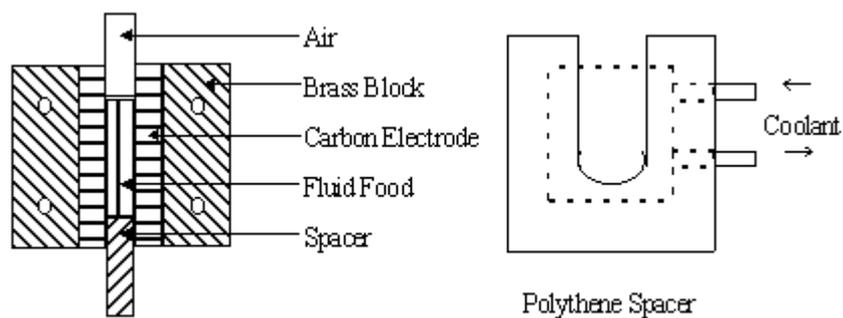
- Câmaras de tratamento

As câmaras de tratamento podem ser estáticas ou contínuas.

Dentro das estáticas estas podem ser:

- Poliestireno em forma de U:

Este modelo consiste em dois eléctrodos de carbono suportados em blocos de metal colocados num espaçador de poliestireno em forma de U. Estes blocos de metal contêm furos para a recirculação de água e para o controlo da temperatura durante o PEF. A área dos eléctrodos e de circulação de produto é regulada pelos diferentes espaçadores utilizados. Os blocos de metal contêm furos para a recirculação de água e para o controlo da temperatura durante o PEF.



*Figura 1: câmara estática com eléctrodos de carbono*

- Câmaras estáticas de bobine de vidro:

Este modelo utiliza uma bobina de vidro envolvendo o ânodo. O volume da câmara é de 20 cm<sup>3</sup>, o que requer um líquido de enchimento com alta condutividade e permissividade semelhante à amostra (meio com solução NaCl,  $\sigma = 0.8$  to 1.3 S/m, líquido de enchimento, água~ 10<sup>-3</sup> S/m).

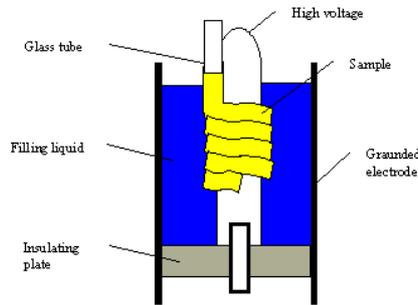


Figura 2: câmara estática de bobine em vidro

As câmaras de tratamento contínuo podem ser:

- Câmaras com membrana condutora de iões:

Um modelo proposto consiste em duas placas paralelas e um espaçador insulador dieléctrico. Os eléctrodos são separados do produto pelas membranas condutoras de iões feitas de poliestireno sulfonado. Um electrólito é utilizado para facilitar a condução eléctrica entre os eléctrodos e as membranas.

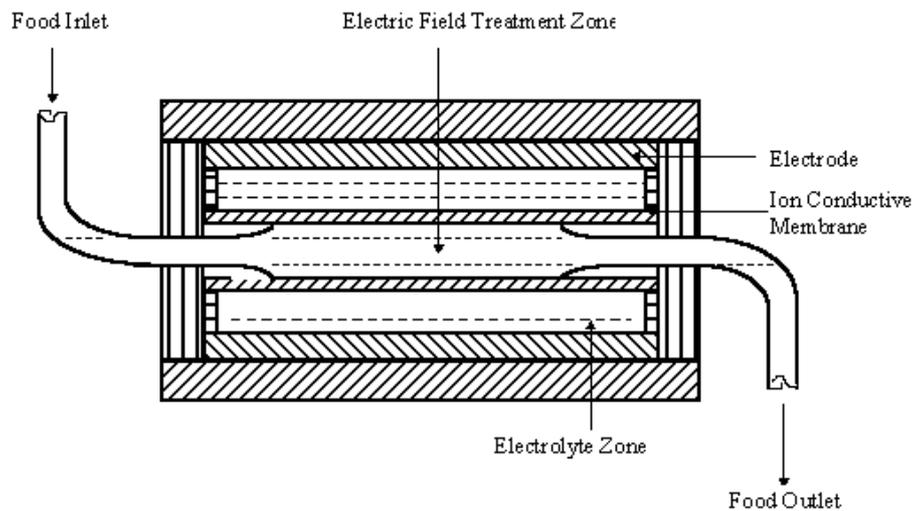




Figura 3: câmara de tratamento contínua com membrana de iões

➤ Câmaras contínua com separadores:

Este desenho consiste em dois eléctrodos em forma de disco, feitos de aço inoxidável separados da câmara por um espaçador de polisulfone. As condições operacionais da câmara são: o volume (20 ou 8ml), espaçamento (0.95 ou 0.51cm), fluxo (1200 ou 6 ml/min.)

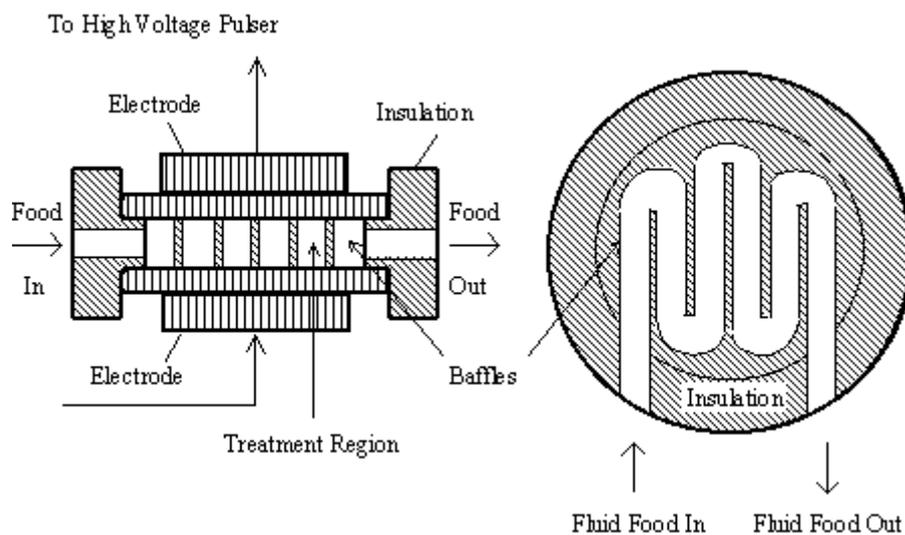


Figura 4: câmara contínua com separadores

➤ Câmaras de tratamento de campo contínuo e aumentado:

Yin e outro (1997) aplicaram o conceito de campos eléctricos aumentados nas zonas do tratamento através do desenvolvimento de uma câmara de co-campo contínuo (fig. 14) com formas cônicas do isolador para eliminar depósitos do gás dentro do volume do tratamento. As regiões cônicas foram projectadas assim para que a tensão através



da zona do tratamento pudesse ser quase igual à tensão fornecida.

Outras configurações com campos eléctricos aumentados são ilustradas em fig. 15 e 16. Nestes projectos a câmara do fluxo pode ter diversas geometrias de secção transversal que podem ser uniformes ou não uniformes

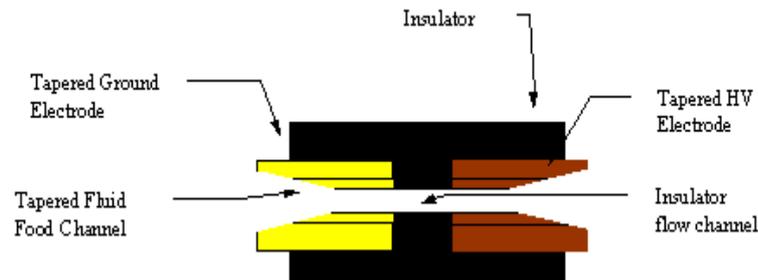
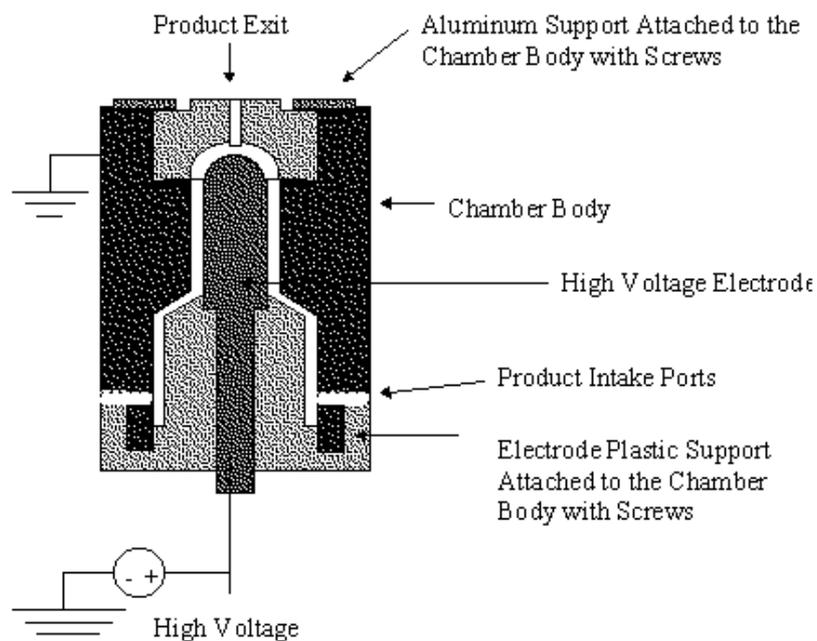


Figura 5: Câmara de tratamento de campo eléctrico aumentado

➤ Câmaras coaxiais:

As câmaras coaxiais são compostas por um cilindro interior rodeado pelo por um eléctrodo exterior cilindro que permite o fluxo de produto entre ambos. A configuração dos eléctrodos foi obtida através da optimização com recurso a computação numérica. Utilizando a forma optimizada, a distribuição do campo ao longo do percurso do fluido sem pontos de aumento. Esta câmara de tratamento foi utilizada com sucesso na inactivação de bactérias patogénicas e não-patogénicas, fungos, fermentos e enzimas presentes em produtos líquidos como sumos de fruta, leite e ovos líquidos inteiros.





*Figura 6: Secção de câmara de tratamento coaxial*

# Princípios do HACCP e Tratamento com Pulsos Eléctricos

As operações fundamentais do tratamento com pulsos eléctricos são a recepção de matérias-primas, a aplicação de pulsos eléctricos, a operação de embalamento asséptico e, finalmente, o armazenamento e distribuição do produto.

## *Aplicação do HACCP ao tratamento com pulsos eléctricos*

▪ **Perigos/Riscos:** Microbiológicos. As matérias – primas, aquando da sua recepção, podem conter uma elevada contaminação microbiana (contaminação microbiana inicial). Também o local onde são armazenadas até ao seu processamento pode aumentar o grau de contaminação das mesmas.

**Químicos:** Entende-se por perigos químicos a presença de antibióticos e resíduos de pesticidas nas matérias-primas, a indução eléctrica de reacções químicas e a presença excessiva de resíduos de detergentes e desinfectantes nos equipamentos.

**Físicos:** Dos riscos físicos faz parte, por exemplo, as matérias estranhas às matérias-primas (pedras, entre



outros).

▪ **Pontos críticos de controlo:** Recepção e zona de armazenamento da matéria-prima; secção de tratamento e secção de embalamento asséptico.

▪ **Monitorização:** Tempo de manipulação e processamento; temperatura do material; limpeza dos equipamentos e utensílios; condições do tratamento (intensidade do campo eléctrico, taxa de pulsos, tensão de entrada, corrente de entrada e temperatura da câmara)... A monitorização é realizada através de osciloscópios (para medir a tensão e corrente) e de contadores de pulso.

▪ **Medidas de controlo:** Para garantir a eficácia do tratamento e a redução do risco de contaminação deve estar nos diversos locais (onde existe pontos críticos) os chamados Procedimentos Operacionais Padrão. Estes definem aspectos tais como: o modo de recepção, de armazenamento e de preparação das matérias-primas; especificações para a montagem e desmontagem de máquinas; o tipo de detergentes e desinfectantes a serem utilizados e a frequência dessa utilização, entre outros.

É importante realçar que a nível do tratamento com pulsos eléctricos existe procedimentos específicos para cada produto alimentar. Esses procedimentos têm como base o risco microbiano, a contagem microbiana inicial, as características físicas e químicas (por exemplo, pH, força iónica e composição) e o tempo máximo para completar o processamento<sup>1</sup> de cada alimento.

*Exemplos específicos de medidas de controlo:*

---

<sup>1</sup> Entende-se por tempo de processamento o intervalo compreendido entre a descarga inicial das matérias-primas até à obtenção do produto na sua forma final (ou seja, embalado e pronto a ser comercializado).



- ✓ A fonte de alimentação de alta tensão, o condensador e a câmara de tratamento devem ser confinados a uma área de acesso restrito;
- ✓ Os interruptores de emergência devem ser acessíveis em caso de falha do processo;
- ✓ Todas as ligações para a câmara de tratamento são isoladas de forma a evitar a fuga de alta tensão através do alimento (líquido ou refrigerante) em contacto;
- ✓ Na área de processamento deve estar sinais de alerta sobre os riscos de segurança;
- ✓ Os funcionários que promovem a limpeza dos equipamentos e instalações devem utilizar dispositivos de protecção tais como máscaras para a cara ou óculos de protecção, avental, botas e luvas.

▪ **Medidas correctivas:** Devem ser realizados procedimentos alternativos que definam acções correctivas para eventuais desvios no processo ou nos limites dos pontos críticos de controlo. Ainda com base nos limites dos pontos críticos de controlo e nas acções correctivas devem ser desenvolvidos procedimentos que garantam a qualidade dos produtos tratados com esta tecnologia não – térmica afim de serem aprovados ou rejeitados.

▪ **Registos:** A elaboração de registos de todos os aspectos referentes ao tratamento com pulsos eléctricos, do fabrico do próprio alimento assim como da limpeza é fundamental para o sucesso das operações. Esses registos devem ser claros o suficiente para não levantar dúvidas e eventuais erros nas diferentes etapas pelas quais o alimento passa.

É ainda importante a existência de esquemas completos da instalação, incluindo detalhes sobre a localização de serviços, de equipamentos e de saídas de emergência.



# Pulsos eléctricos: utilização

A utilização de pulsos eléctricos como ferramenta de processamento de alimentos está a ganhar popularidade uma vez que representa um tratamento não térmico (o que implica vantagens a nível da riqueza nutricional dos alimentos) alternativo à pasteurização convencional e aos métodos de esterilização. Também a não utilização de conservantes é um dos factores a favor desta tecnologia. A grande desvantagem é o investimento inicial.

*Exemplo das vantagens da aplicação desta tecnologia – Sumo de laranja:* redução em cinco ciclos logaritmos da população microbiana após 35 pulsos de 100us, a uma tensão de 33,6-35,7 kV / cm e a uma temperatura de processo de 42 °C – 65 °C. A vida de prateleira do sumo de laranja aumentou de 3 dias para 1 semana sem nenhuma mudança significativa no odor ou sabor.

## ▪ Inactivação de Microrganismos

A inactivação microbiana por pulsos eléctricos depende das características do alimento (pH, condutividade...) a que se está a aplicar o tratamento, do campo eléctrico, da temperatura, do número de pulsos, do tempo, entre outros. Consoante estes factores, a redução de ciclos logaritmos em relação a determinado



microrganismo varia.

Após vários estudos concluiu-se que a aplicação desta tecnologia aos alimentos inactiva os microrganismos sem alteração significativa das propriedades sensoriais e físicas.

## Aplicações dos PEF's no processamento de alimentos

### ➤ Leite ultrafiltrado simulado

A inactivação da E. Coli varia em função da intensidade do campo eléctrico, número de pulsos e pH.

Um aumento do número de pulsos e no campo eléctrico a partir de 40-50 kV/cm faz aumentar a inactivação da E.Coli. Esta inactivação foi mais significativa para pH 5,69 do que para pH 6,82. Para estas experiências o efeito da temperatura (10 ou 15 °C) na inactivação não foi estatisticamente significativo.

A força iónica da solução também desempenha um papel importante na inactivação de E. coli. Um aumento da força iónica aumenta a mobilidade dos electrões através da solução, resultando numa diminuição da taxa de inactivação.

A fase de crescimento de E.Coli afectou a eficácia dos tratamentos PEF. As células em fase logarítmica, foram mais sensíveis aos tratamentos de campo eléctrico em relação a células na fase estacionária e lag.

Usando exponencialmente pulsos decadentes e pulsos de onda quadrada de 35 kV/cm a taxa de inactivação aumenta com um aumento da temperatura, o que sugere efeitos sinérgicos de alta intensidade para campos eléctricos com temperaturas moderadas. A taxa de inactivação aumenta quando pulsos de onda quadrada foram utilizados, em comparação com pulsos decadentes exponenciais.

### ➤ Sopa de ervilha

A inactivação de E. coli e B. subtilis suspenso em sopa de ervilha depende da



intensidade do campo eléctrico, número de pulsos, taxa de pulsos, e taxa de fluxo. O pico de temperatura máxima da sopa atingido durante o tratamento PEF foi de 55 °C e é uma função da taxa de fluxo e taxa de pulsação. Tratamentos com uma temperatura média abaixo de 53 °C resultou em inactivação microbiana limitada (< 1.64D). A inactivação térmica de microrganismos foi evitada por arrefecimento da sopa de ervilha tratada a 20 °C. A inactivação térmica de E. coli exige até 10 min a 61 °C, quando suspensas em caldo de carne. A inactivação de B. subtilis e E. coli diminuiu quase 2D quando os microrganismos foram misturados em sopa de ervilha.

Os resultados para a inactivação de E. coli e B. subtilis utilizando PEF demonstram a viabilidade da tecnologia para a preservação de alimentos que contêm partículas em suspensão e amido gelatinizado.

#### ➤ Ovos líquidos

Alta intensidade de PEF (26 kV / cm) no tratamento em sistemas de fluxo contínuo inactiva E. coli inoculada em ovo líquido. Tratamento com 4 µs pulsos eram mais eficazes do que 2 µs pulsos, que pode ser explicado pela quantidade de energia aplicada no ovo líquido. O efeito da entrada de energia na inactivação de E:Coli, com entrada de energia ( em Joules) é calculado da seguinte forma:

$$\text{Energia/Pulso} = 0.5CV^2$$

onde C é a capacitância e V o potencial medido através da câmara de tratamento (15,6 kV). A entrada de energia total (em Joules), após n pulsos é calculado através de:

$$\text{Energia total} = n \cdot \text{energia /pulso}$$

A fracção de sobrevivência de E. coli em ovo líquido é reduzida quase 6D com 12.000 J aplicado em pulsos de 4 us.

As proteínas que são um nutriente importante para o crescimento microbiano, diminuem a eficácia do tratamento PEF. Em geral, o efeito bactericida do PEF é inversamente proporcional à força iónica e aumenta com a resistência eléctrica. A resistência eléctrica de ovo líquido é baixa quando comparada com outros alimentos e torna necessária a exposição de ovos líquidos a um grande número de pulsos.



➤ Sumo de maçã

O tratamento do sumo de maçã concentrado com a tecnologia PEF a 50 kV/cm, e a 10 pulsos, com uma largura de pulso de 2  $\mu$ s e a uma temperatura máxima de 45° C proporciona um prazo de validade de 28 dias. Comparado com o sumo de maçã fresco regista uma significativa melhoria, visto que este só tem um prazo de 21 dias.

O sumo de maçã ultrafiltrado comercial exposto ao tratamento com PEF não manifestou alterações de pH, acidez, vitamina C, glucose, frutose e sacarose. A inactivação da *S.cerevisiae* em suspensão no sumo de maçã é afectada pela intensidade do campo eléctrico, o tempo de tratamento e número de pulsos. A taxa de inactivação sobe com o aumento da intensidade de campo.

➤ Leite desnatado

○ Tratamento numa câmara estática

O tratamento PEF inactiva a *E.coli* no leite desnatado a 15°C. A intensidade do campo eléctrico e o tempo de tratamento influenciam a inactivação microbiana, podendo ser expressos pelo número de pulsos (n) quando o comprimento de cada pulso é apresentado. A uma intensidade de campo constante, a fracção de sobrevivência da *E.coli* desce quando o leite é tratado com um número crescentes de pulsos. A taxa de inactivação de *E.coli* aumenta com a subida da intensidade do campo eléctrico a um número constante de pulsos.

Assim, pode-se observar que a cinética de inactivação PEF de produtos semi-sólidos são diferentes da cinética de inactivação PEF em fluido devido as células de *E. coli* são fixadas em uma matriz de gel, que aumenta a uniformidade de inativação. Logicamente, a inactivação de *E.coli* do leite desnatado por tratamento PEF numa câmara estática satisfaz o modelo Hulsheger porque a destruição deste microrganismo seguiu uma cinética de primeira ordem para a intensidade de campo eléctrico.

Como o leite desnatado tem um complexo teor em proteína é mais difícil reduzir a sua fracção de sobrevivência de microrganismos presentes, do que numa solução tampão e em alimentos modelo. Assim, o efeito letal do PEF em



microrganismos é reduzido porque as proteínas absorvem radicais livres e iões, que são activos na destruição das células, e a inactivação de bactérias pela PEF é uma função de resistência á solução, inversamente proporcional à força iónica. A sobrevivência da fracção microbiana diminui quando aumenta a resistência e diminui a força iónica. Uma vez, que a diluição do leite aumenta a resistividade e diminui a concentração da proteína, a eficácia do tratamento PEF é melhorado.

- Tratamento num sistema contínuo

Com o tratamento PEF numa câmara de fluxo contínuo também inactiva E.coli inoculada no leite desnatado. Com o aumento do número de pulsos ou da intensidade do campo eléctrico há uma maior inactivação microbiana, num sistema contínuo de 30kV/cm. Assim, este sistema é mais eficaz do que o sistema estático devido à maior uniformidade do tratamento e á maior densidade da energia. A eficiência deste tratamento também depende da duração dos pulsos, aumentando a inactivação da E.coli pela maior energia aplicada em cada pulso.



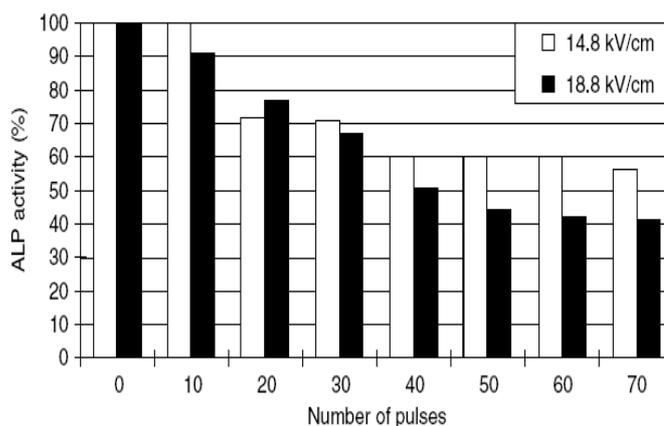
# Desnaturação de proteínas

Para que o PEF possa ser usado em substituição ao emprego de calor, é necessário que este seja eficiente tanto na destruição de microrganismos como também na inactivação enzimática. Ainda não há um consenso sobre qual é o mecanismo de actuação dos PEFs nas enzimas. Para alguns autores a inativação pode ocorrer devido a oxidação de alguns componentes da enzima como grupos sulfidrilas, Para outros autores a inactivação enzimática ocorre devido a mudanças na estrutura terciária e ou secundária da proteína.

## Actividade da fosfatase alcalina (ALP)

Método que serve para determinar, se a pasteurização do leite foi realizada correctamente e também para detectar possíveis adições de leite cru ao leite pasteurizado. Quanto á sua forma, no leite cru fresco, ALP está presente em associação com a membrana dos glóbulos de gordura e em leite desnatado está na forma de partículas de lipoproteínas.

A Presença de ALP activo indica a pasteurização inadequada ou contaminação cruzada com leite cru. A inactivação da ALP por PFE depende: da intensidade do campo; do teor de gordura do leite e da concentração da ALP.





*Fig7. – Actividade de ALP diluída em 2% de leite UHT, comparando dois campos de intensidade.*

## Conclusão

Os PEFs são utilizados para a preservação de alimentos, um processo de conservação não térmico que contribui: na inactivação de microrganismos; na inactivação de enzimas; na retenção de vitaminas e que ainda pode ser usado no complemento de outros processos térmicos habitualmente aplicados aos produtos alimentares, para sua conservação. No entanto, continua a ser um processo pouco utilizado e explorado apesar de ter sido implementado em 1960.



# Bibliografia

Rahman, S. (2007), **Handbook of food preservation, Volume 167**, 2ed, CRC Press, p.783 - 812.

Ramos, A. M.; Teixeira, L.J. Q.; Stringheta, P. C.; Chaves, J.B. P.; Gomes, J. C., (2006), **Aplicação de campos eléctricos pulsados de alta intensidade na conservação de alimentos**, 428 revista, Ceres.