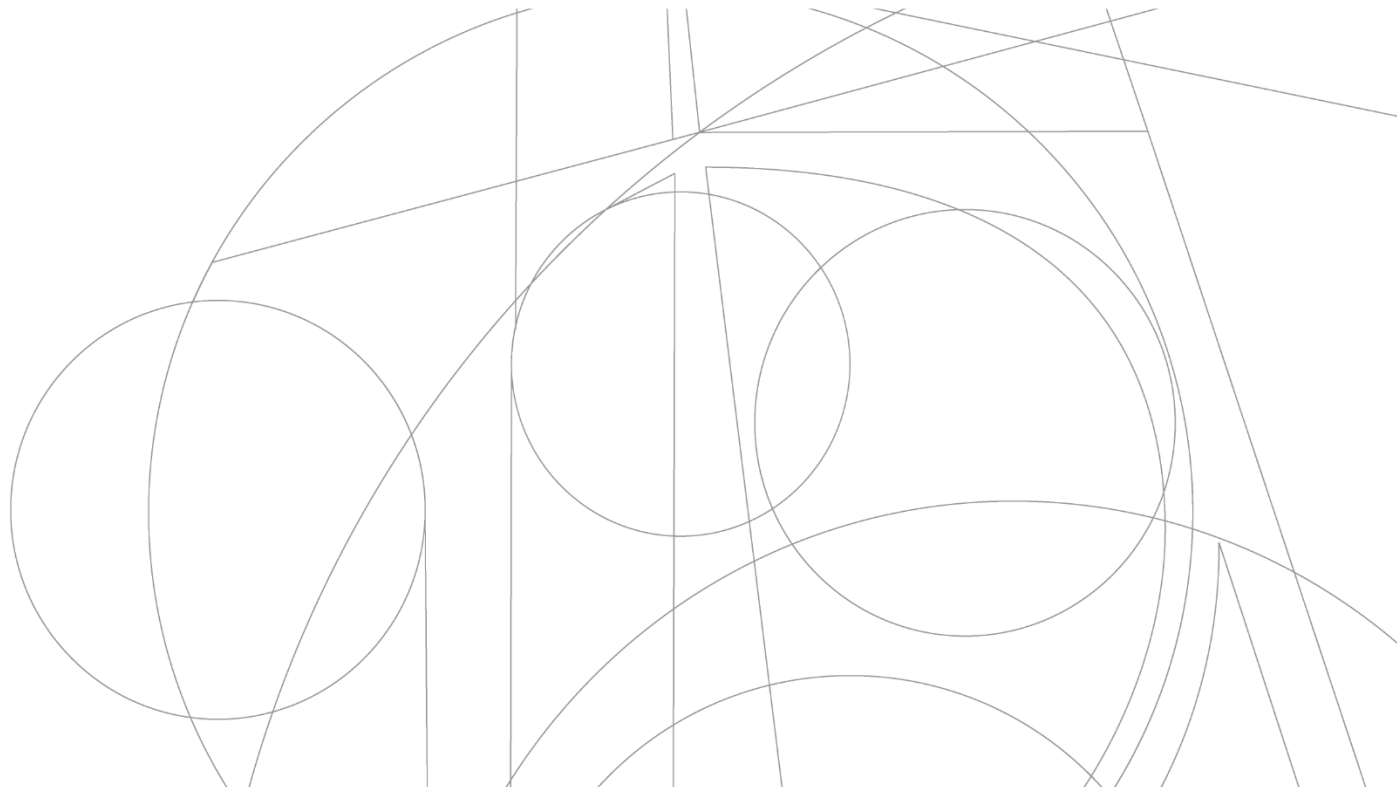




APLICAÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICOS PULSADOS EM BATATA E BETERRABA
Ilda Lopes Martins

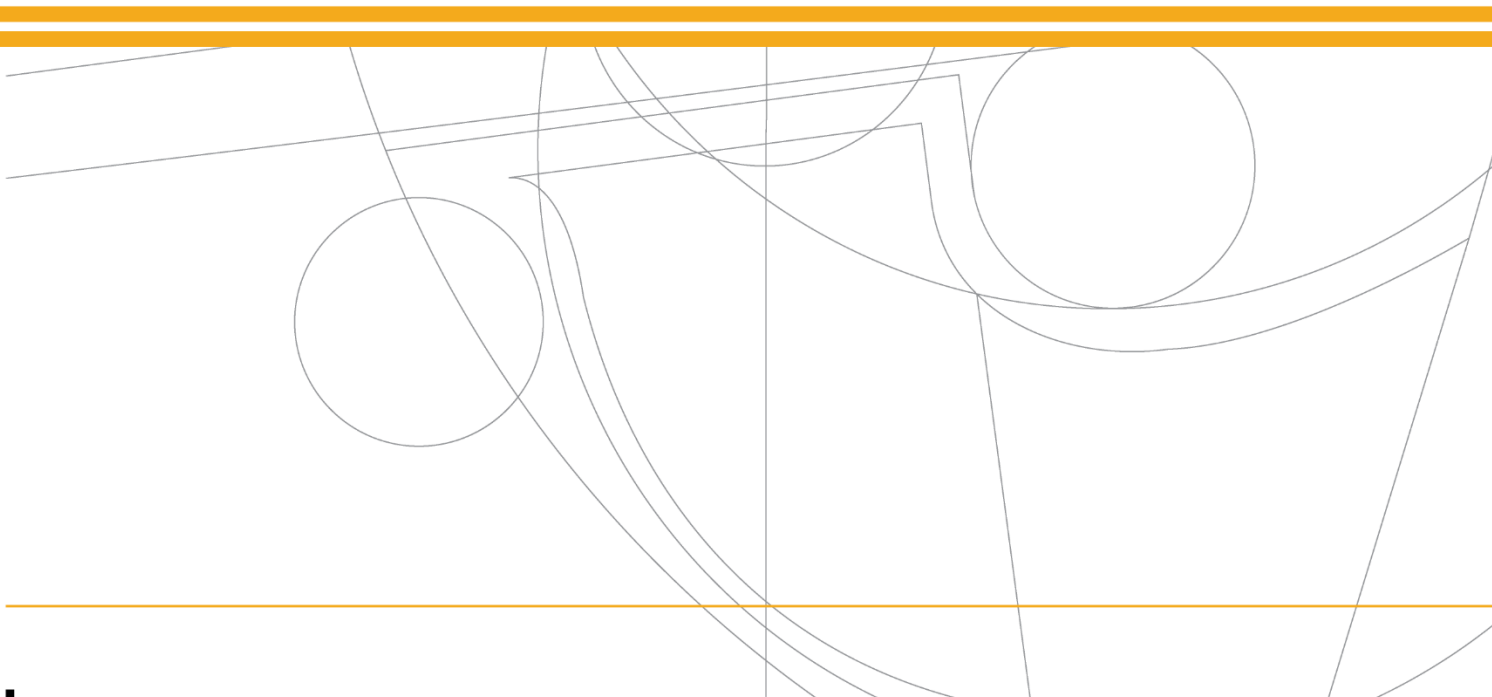
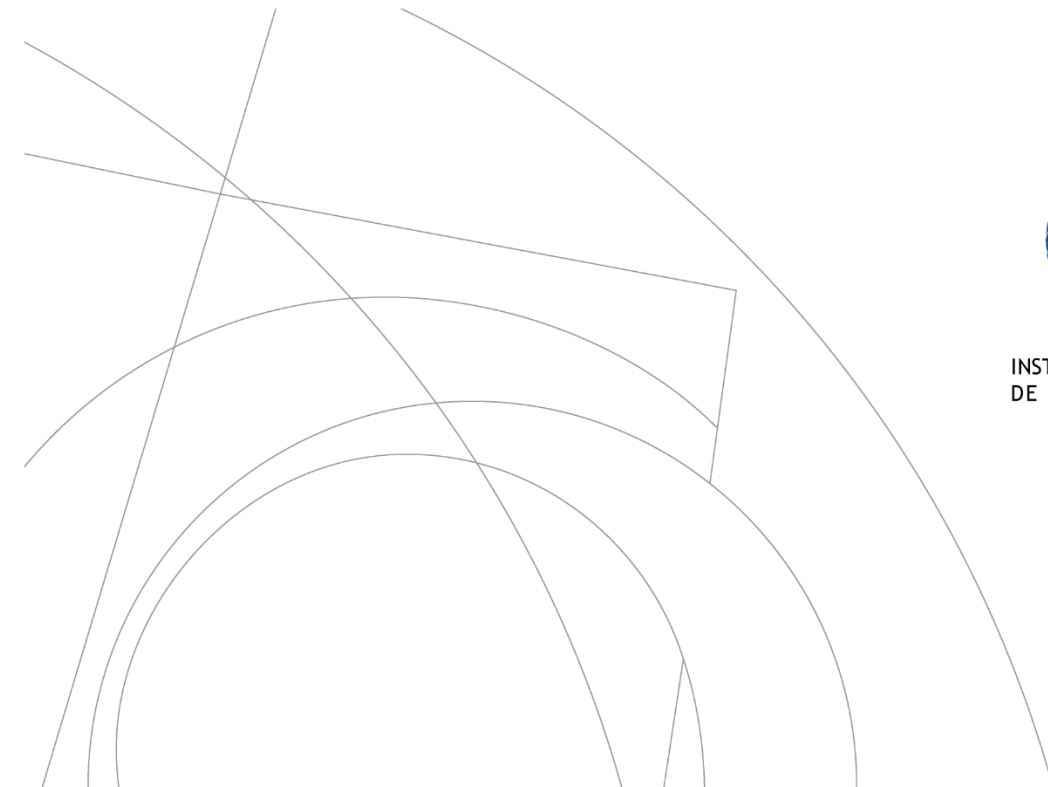
2024



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

APLICAÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICOS PULSADOS EM BATATA E BETERRABA

Ilda Lopes Martins



Escola Superior de Tecnologia e Gestão



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Ilda Lopes Martins

APLICAÇÃO DE CAMPOS ELÉTRICOS PULSADOS EM BATATA E BETERRABA

Nome do Curso de Mestrado
Mestrado em Engenharia Alimentar

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Manuel Rui Alves
e coorientação de
Professora Doutora Maria Alberta Araújo

Julho de 2024

MEMBROS DO JÚRI

Presidente:

Doutora Maria Manuela de Lemos Vaz Velho

Professora Coordenadora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo

Vogal:

Doutora Helena da Conceição Pereira Albano

Professora Coordenadora Convidada do Instituto Politécnico de Coimbra, arguente

Vogal:

Doutor Manuel Rui Fernandes Azevedo Alves

Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, orientador

AGRADECIMENTOS

“O único lugar em que o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”. Começo por citar Albert Einstein, pois foi a frase que ouvi de um professor no primeiro ano da minha licenciatura e que desde então levo comigo para a vida.

A realização deste trabalho só foi possível graças à colaboração de várias pessoas que me ajudaram de diferentes formas.

Começo por agradecer ao meu orientador Professor Doutor Manuel Rui Alves e à minha coorientadora Professora Doutora Maria Alberta Araújo por toda a disponibilidade e paciência. Por estarem sempre presentes e me orientarem.

À professora Manuela Vaz Velho pelo estímulo e apoio para levar a cabo esta etapa.

À Engenheira Susana Rocha por toda ajuda e disponibilidade prestada no laboratório.

À Núria Reis e Diana Barros pelas inúmeras vezes que me ajudaram no laboratório e um agradecimento muito especial ao Ricardo Pinto por nunca me ter deixado desistir, ajudando-me sempre.

À minha família por me ter proporcionado chegar até aqui. À minha estrelinha guia, meu Pai: onde quer que estas a olhar por mim e a iluminar o meu caminho. Aos meus amigos por todo o carinho e apoio nas horas de desespero e em especial ao Luís Gaifém, à Soraia Alves, ao Bruno Viana e a Paulo Lopes, por ter caminhado lado a lado comigo ao longo de vários anos.

Por fim, e não menos importante, a ti Armandina Silva, gratidão por me teres levantado várias vezes ao longo deste percurso atribulado e feito acreditar que este sonho seria possível de realizar. Isto só foi possível devido à cumplicidade, carinho, amizade e ternura entre nós.

RESUMO

Os campos elétricos pulsados, ou *Pulsed Electric Fields* (PEF) é uma tecnologia não térmica que atua ao nível das membranas celulares causando a sua permeabilização resultante das distorções provocadas pela aplicação do campo elétrico, este fenómeno também é conhecido por eletroporação. O que define o PEF é a ação de pulsos elétricos curtos de elevada intensidade que atuam ao nível das estruturas provocando efeitos benéficos que seriam difíceis utilizando outras tecnologias, por exemplo térmicas e onde o efeito da temperatura pode provocar alterações adversas nos alimentos.

Os campos elétricos pulsados tem vindo a ser utilizados como pré-tratamento para algumas operações na indústria alimentar de forma a facilitar e rentabilizar, processos como a extração de compostos.

A inativação microbiológica sem alterações das propriedades sensoriais e nutricionais do produto é outra grande vantagem desta técnica promissora.

Neste estudo foi efetuada a aplicação de diferentes campos elétricos pulsados com recurso ao equipamento EPULSUS®-LPM1A-10 (EnergyPulse Systems, Lda) em batatas e beterrabas, com a finalidade de avaliar os seus efeitos ao nível das suas propriedades físicas.

Neste estudo foram utilizadas duas fatias com aproximadamente 10 g cada e 5 mm de espessura de batata e beterraba, submersas em 200 ml de água. Foram utilizadas as seguintes condições experimentais: frequência 50 Hz, tamanho dos pulsos de 200 μ s e o número de pulsos de 200. Como a voltagem máxima do equipamento é 10000 V foram realizados vários ensaios, utilizando voltagens de 1200, 5000, 7000 e 10000V. A avaliação do efeito do PEF na textura da batata e beterraba foi realizada através de um texturómetro (TA.XT. plus) Stable Micro Systems (Goldaming, England) equipado com diferentes sondas. Para avaliação dos testes de penetração foi utilizada uma sonda cilíndrica (*Cylinder Probe P/7*) e avaliar a variação da dureza com o campo elétrico foi utilizado um dispositivo com três pontos de torção (*Three Point Bend Rigs HDP/3PB*) (força máxima). Foi também avaliada a quantidade de exsudado utilizando uma sonda *Cylinder Probe P/75*. Os resultados foram também avaliados pela quantificação dos açúcares totais em solução por espectrofotometria em função do campo elétrico.

A diferença total de cor das amostras de beterraba foi determinada por colorimetria. Para a sua determinação foi utilizado um colorímetro CHORA METER CR-400 (Konica Minolta, USA), e o sistema CIE L^* a^* b^* . Determinou-se a diferença total de cor das amostras, utilizando como branco a amostra sem tratamento PEF.

Nos resultados obtidos dos testes de compressão, foi visível para ambas as amostras, batata e beterraba que, quanto maior a intensidade do campo elétrico menor a força exercida pelo texturómetro para a deformação, concluindo-se assim que a firmeza diminui com o aumento do campo elétrico. Na análise do exsudado, como resultado da aplicação do teste de compressão, o aumento do campo elétrico aumenta ligeiramente a quantidade de exsudado libertado. Na beterraba aumentaram os açúcares totais libertados para a solução em função do campo elétrico. A diferença total de cor na beterraba foi obtida através da diferença de cor para os 3 parâmetros de cor. Pode-se concluir que quanto maior a aplicação do campo elétrico utilizado maior é a diferença de cor, principalmente no componente L^* , ou seja, com o aumento do campo elétrico a luminosidade diminui, logo as amostras ficam mais escuras.

Conclui-se, que, de fato existem alterações na textura final das amostras, pelas alterações da dureza (deformação), assim como na libertação de açúcares redutores para a solução e intensificação de cor (essencialmente da luminosidade). Quanto maior a aplicação do campo elétrico pulsado, maior o efeito final em ambas as amostras, batata e beterraba, essencialmente na textura, como resultado das alterações provocadas pela atuação dos campos elétricos na microestrutura das amostras.

PALAVRAS-CHAVE: *Pulsed electric fields* (PEF); Textura; beterraba; batata

ABSTRACT

Pulsed Electric Fields (PEF) is a non-thermal technology that acts at the level of cell membranes causing their permeabilization resulting from the distortions caused by the application of the electric field, this phenomenon also known as electroporation. What defines PEF is the action of short electrical pulses of high intensity that act at the level of structures, causing beneficial effects that would be difficult using other technologies, for example thermal and where the effect of temperature can cause adverse changes in food.

Pulsed electric fields have been used as pre-treatment for some operations in the food industry in order to facilitate and make profitable processes such as the extraction of compounds.

Microbiological inactivation without altering the sensorial and nutritional properties of the product is another great advantage of this promising technique.

In this study, different pulsed electric fields were applied to potatoes and beets using the EPULSUS®-LPM1A-10 equipment, EnergyPulse Systems, Lda, in order to evaluate their effects in terms of texture and color.

The potato and beet samples used in this study consisted of two slices with approximately 10 g each and 5 mm in thickness, submerged in 200 ml of water. The PEF conditions used that did not vary in carrying out the experimental tests were the frequency with a value of 50 Hz, the size of the pulses with a value of 200 μ s and the number of pulses with a value of 200. Only the voltage (V) varied in carrying out the tests, being used for the voltage tests at 1200, 5000, 7000 and 10000V. The evaluation of the effect of pulsed electric fields on potato and beet texture was performed using a texturometer (TA.XT. plus) Stable Micro Systems (Goldaming, England) equipped with a cylindrical probe (Cylinder Probe P/7) in the evaluation of penetration tests and a device with three points of twist (Three Point Bend Rigs HDP/3PB) in the compression tests to evaluate the variation of hardness (maximum force) and deformation as the electric field increases. The amount of exudate was also evaluated using a Cylinder Probe P/75 probe. The effects were also evaluated by quantifying the total sugars in solution analyzed according to the Munson and Walker technique (NP 1419:1987) by spectrophotometry. This method

initially consists of the hydrolysis of sugars and subsequent total quantification by spectrophotometry. The total color difference of the beet samples was also determined by colorimetry. For its determination, a colorimeter CHORA METER CR-400 (Konica Minolta, USA) and the CIE $L^* a^* b^*$ system were used. The total color difference of the samples was determined, using the sample without PEF treatment as a blank.

In the results obtained from the compression tests, it was visible in both products that the greater the intensity of the electric field used, the lower the force exerted by the texturometer for deformation, thus concluding that the firmness decreases with the increase of the electric field. In the analysis of exudate, as a result of applying the compression test, the increase in the electric field increases the amount of exudate released, despite the differences being very small. The total sugars released into the solution increase with the increase in the electric field in the beet tests. In potatoes there is an increase until the application of the electric field value of 0.5 KV/Cm, and between 0.5 and 1 KV/Cm there is a slight decrease close to the initial value. The total color difference in beetroot was obtained through the color difference between the 3 color parameters. It can be concluded that the greater the application of the electric field used, the greater the difference in color, especially in the L^* component, that is, with the increase of the electric field, the luminosity decreases, so the samples become darker.

It is concluded that, in fact, there are changes in the final texture of the samples, due to changes in hardness (deformation), as well as in the release of sugars to the solution and color intensification (essentially of the luminosity). The greater the application of the pulsed electric field the greater the final effect in both samples, potato and beet, essentially in the texture, as a result of the alterations caused by the action of the electric fields in the microstructure of the samples.

Keyword: Pulsed electrical fields; texture; beet; potato

ÍNDICE

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura do documento	3
2. Revisão bibliográfica	4
2.1 Pulsed Electric Fields (PEF)	4
2.2 Funcionamento dos campos elétricos pulsados.....	5
2.3 Variáveis do processo no tratamento PEF	8
2.4 Vantagens da técnica PEF	10
2.5 Desvantagens da técnica PEF	12
2.6 Fatores que influenciam o efeito dos PEF	13
2.7 Aplicação da técnica PEF em alimentos	14
2.8 Efeitos do tratamento PEF na textura	16
3. Materiais e Métodos	18
3.1 Batata	18
3.2 Beterraba.....	19
3.2.1 Utilização de PEF na beterraba	20
3.3 Matérias-primas	20
3.4 Preparação das amostras para análise PEF.....	21
3.5 Campos elétricos pulsados: condições e equipamento	23
4. Métodos Analíticos	24
4.1. Análise da textura	24
4.1.1. Teste de Compressão.....	25
4.1.2. Teste de Penetração.....	27
4.2 Determinação da cor por colorimetria	29
4.3 Determinação dos açúcares totais.....	30
5. Resultados e Discussão.....	31
5.1. Beterraba.....	31
5.1.1. Teste de Penetração	31
5.2.1 Teste de Compressão	32

5.2.2	Açúcares totais	34
5.2.3.	Cor	35
5.2.	Batata	38
5.2.1.	Teste de Penetração	38
5.3.2.	Teste de compressão	39
5.3.3.	Açúcares totais	41
6.	Conclusão	43
7.	Referências Bibliográficas	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Esquema de um sistema de PEF no processamento de alimentos (adaptado de Mohamed et al. 2012).	6
Figura 2 - Formas de onda de pulso elétrico no tratamento PEF: Pulso quadrado e exponencial (adaptado de Raso et al., 2016).	7
Figura 3 - Formas de onda unipolar de pulso elétrico no tratamento PEF: Pulso quadrado e exponencial (adaptado de Altunakar, 2007).	7
Figura 4. - Esquema da configuração dos elétrodos na câmara de tratamento e exemplo do pulso formado (adaptado de Raso et al., 2016).	9
Figura 5 - Diferentes partes da Batata (adaptado de Flourishingplants 2022).	18
Figura 6. Fluxograma de preparação das amostras.	21
Figura 7. Utensílio de moldagem para a batata e a beterraba.	21
Figura 8. Câmara de tratamento fechada com amostra de beterraba.	22
Figura 9. Equipamento PEF (à esquerda) e pormenor da câmara de tratamento fechada para processamento em batch.	22
Figura 10. Texturómetro com a sonda Cylinder Probe P/75.	25
Figura 11.- Ensaio com a sonda Cylinder Probe P/75 e amostra em análise.	26
Figura 12. Ensaio com a sonda Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell) com amostra de beterraba.	27
Figura 13. Exemplos de perfurações da sonda cilíndrica P/2 na batata e beterraba.	27
Figura 14. Teste de penetração com a sonda P/2 com amostra de batata.	28
Figura 15. Gráfico CIELAB Color Space (Fonte: datacolor.com).	29
Figura 16. Força máxima em função do campo elétrico em beterraba.	31
Figura 17 - Perda de peso (%) em função do campo elétrico em beterraba.	32
Figura 18. Força máxima em função do campo elétrico em beterraba no teste de compressão.	33
Figura 19. Quantidade de açúcares totais (glicose) em solução em função do campo elétrico nos ensaios em beterraba.	34
Figura 20 - Variação de cor em função do campo elétrico em meio líquido.	36
Figura 21. Amostras da solução com beterraba após aplicação de PEF de diferentes intensidades.	36
Figura 22. Resultados da variação total de cor em função do campo elétrico nos ensaios em beterraba.	37
Figura 23. Cor da beterraba em função do campo elétrico.	38
Figura 24. Força máxima (N) em função do campo elétrico na batata.	39
Figura 25. Perda de peso (%) em função do campo elétrico na batata.	40

Figura 26 - Força máxima em função do campo elétrico com a sonda Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell) em batata.	41
Figura 27 - Concentração de açúcares totais em função do campo elétrico aplicado em batata.	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Composição da batata. Fonte: Instituto Nacional Dr. Ricardo Jorge.....	19
Tabela 2. Condições PEF para a beterraba e a batata.....	23
Tabela 3. Métodos e equipamentos utilizados nos ensaios PEF.....	24
Tabela 4. Resultados do parâmetro LAB* de cor em meio líquido.	35
Tabela 5. Parâmetros de cor da beterraba em função do campo elétrico.	37

1. Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito da obtenção do grau de mestre em Engenharia Alimentar, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) do Instituto Politécnico de Viana do Castelo. O trabalho experimental foi realizado nos laboratórios de engenharia alimentar (ESTG) e consistiu no estudo da aplicação da técnica de campos elétricos pulsados (PEF, *Pulsed Electric Fields*) em alimentos utilizando um equipamento laboratorial, (EPULSUS – LPM1A-10), fornecendo até 10 kV/ 200A de pulsos monopolares positivos onda quadrada e frequência máxima de 3 kW.

Neste trabalho, foram desenvolvidos métodos analíticos de análise para avaliação do efeito da aplicação de PEF em alimentos sólidos, nomeadamente na batata e beterraba. Foram também variados alguns dos parâmetros do equipamento de forma a otimizar os resultados obtidos.

1.1. Enquadramento

A tecnologia PEF é uma tecnologia emergente, que consiste na aplicação de energia elétrica de alta intensidade por períodos muito curtos. Os alimentos são colocados numa câmara de tratamento, entre 2 elétrodos de material inerte mergulhados num fluido condutor (em geral água ionizada). É um método de processamento não térmico e não químico, e por isso muito promissor na indústria alimentar. A aplicação desta técnica a montante facilita várias operações processuais, como seja o caso da transferência de massa (extração de compostos), desidratação, secagem e também processos de inativação microbiana, com redução da carga térmica durante a pasteurização de alimentos, tendo como vantagem a retenção ou minimização das modificações sensoriais e nutricionais provocadas pelos processos térmicos. Os campos elétricos pulsados atuam sobre as membranas celulares, provocando a sua distorção devido à alteração da distribuição de cargas (iões), o que faz com que aumente a respetiva permeabilização. Têm sido sugeridos vários modelos teóricos, mas não existem evidências claras sobre o mecanismo de ação subjacente ao nível celular, uma vez que varia conforme a microestrutura das amostras (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009). Este fenómeno é também conhecido por eletroporação. O fenómeno de eletroporação pode ser aplicado na

otimização dos processos de extração ou absorção, de desidratação e de outros processos de transferência de massa entre a célula e o meio envolvente (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009), já que facilita as trocas entre o interior e exterior das células. Na década de 50 esta tecnologia foi aplicada no tratamento de matrizes biológicas. Posteriormente, observou-se que o tratamento com campos elétricos pulsados induzia a interrupção de fluxos elétricos nas membranas celulares, ou seja, produzia o efeito de eletroporação, podendo ser utilizada para reduzir o número de microrganismos presentes num alimento (Barba *et al.*, 2015). O crescente interesse pelo uso de campos elétricos como tecnologia de conservação de alimentos iniciou-se já no início do século XX através do aquecimento ómico. Quando um alimento é submetido a uma diferença de potencial elétrico, produz-se um aquecimento que pode substituir a pasteurização tradicional com vantagens, por ser um aquecimento muito rápido e uniforme em toda a massa do alimento. Esse aquecimento é devido à resistência elétrica intrínseca do alimento.

Os campos elétricos pulsados surgiram do interesse em explorar formas de desenvolvimento de processos similares à pasteurização e transferência de massa, mas que não causem aquecimento e consequentemente alterações mínimas nas propriedades dos alimentos (Binoti *et al.*, 2012; Ramos *et al.*, 2006).

1.2. Objetivos

Os principais objetivos da presente dissertação são:

- Estudo da técnica PEF, nomeadamente dos parâmetros fundamentais dos campos elétricos: voltagem, frequência, duração e intensidade dos pulsos.
- Selecionar os parâmetros de estudo da técnica PEF sobre alimentos, batata e beterraba, de acordo com a literatura e efeitos desejados;
- Selecionar e implementar os métodos analíticos para avaliação do efeito do PEF nos alimentos.
- Comparar os resultados com base nos produtos alimentares estudados: batata e beterraba.

1.3. Estrutura do documento

A presente dissertação é constituída por 6 capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema dos campos elétricos pulsados, objetivos e descrição sucinta da estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre PEF. São descritas as vantagens e desvantagens da aplicação do PEF em alimentos.

No início do Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica das matérias-primas utilizadas neste estudo (batata e beterraba e são descritos todos os materiais e métodos, indicando os procedimentos laboratoriais utilizados na técnica PEF, assim como os métodos analíticos utilizados na caracterização das amostras antes e após tratamento PEF.

No capítulo 4 são evidenciados os métodos analíticos e equipamentos utilizados na análise da textura (compressão e penetração), análise da cor e dos açúcares totais em batata e beterraba.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos. Por fim, no sexto e último capítulo é feita a conclusão do estudo efetuado, bem como proposta para trabalhos futuros. Seguidamente, apresenta-se a lista de referências bibliográficas e apêndices.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica do processo de tratamento pelo método PEF, o funcionamento dos campos elétricos pulsados, as vantagens/desvantagens e os fatores que influenciam o seu processo. Por fim, é feita uma breve revisão da técnica na área alimentar.

2.1 Pulsed Electric Fields (PEF)

Os campos elétricos pulsados ou PEF consistem numa tecnologia que utiliza energia elétrica de alta intensidade por curtos períodos de tempo (Barba *et al.*, 2015). O PEF aplica pulsos elétricos de alta potência a um produto colocado numa câmara de tratamento entre dois eletrodos (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009).

A aplicação inicial da tecnologia de campo elétrico no processamento de alimentos data do início da década de 1920, quando um campo elétrico alternado de baixa tensão foi utilizado pela primeira vez na pasteurização do leite. Desde então, pesquisas têm demonstrado os efeitos positivos do campo elétrico na inativação de microrganismos, resultantes da eletroporação e da ruptura das membranas celulares. Nos últimos anos, estudos sobre tecnologias de campo elétrico têm destacado suas aplicações na inativação de microrganismos e enzimas, congelamento e descongelamento, extração de compostos valiosos, aceleração da secagem e vinificação (Wang *et al.*, 2018)

Os pulsos elétricos na ordem dos microssegundos (μ s) a milissegundos (ms), podem ser aplicados a biomateriais de origem vegetal ou animal, ou suspensões de microrganismos colocadas entre dois eletrodos condutores dentro de uma câmara de tratamento, a fim de expor o material biológico a um campo elétrico cuja intensidade depende da voltagem entre os eletrodos e da geometria do espaço entre os mesmos. A permeabilização da membrana é causada pelo impacto dos PEF, conduzindo a um aumento da permeabilidade passiva a diferentes tipos de iões e moléculas (Raso *et al.*, 2016). Partículas polares ou carregadas sofrem alterações sob campos elétricos, como polarização e realinhamento das moléculas de água, reduzindo a energia do sistema. Proteínas e enzimas podem ter sua atividade diminuída devido a mudanças conformacionais. Campos elétricos específicos fortalecem ligações de hidrogênio

alinhadas com o campo e enfraquecem as ortogonais, diminuindo a constante dielétrica e aumentando a tensão superficial da água, o que acelera a transferência de massa e calor (Wang et al., 2018).

A aplicação de pulsos elétricos de alta voltagem nas células vai formar poros, que podem ser transitórios ou permanentes na membrana celular, acreditando-se que o mecanismo de permeabilização da membrana esteja relacionado com a acumulação de cargas opostas nos dois lados das membranas celulares, causando o fenômeno de eletroporação (Fincan and Dejmek, 2002).

2.2 Funcionamento dos campos elétricos pulsados

O equipamento PEF geralmente inclui um gerador de impulsos elétricos, uma câmara onde esses impulsos atravessam o produto alimentar e bombas de circulação. A tecnologia PEF envolve a aplicação de alta tensão, com pulsos curtos (de alguns a dezenas de μs) em uma frequência específica (Hz), o que aumenta a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos alimentos líquidos ou dos alimentos imersos em líquidos (Sampedro et al., 2013; Arshad et al., 2021).

Um sistema PEF para processamento de alimentos consiste em três componentes básicos: um gerador de pulsos de alta tensão, uma câmara de tratamento e um sistema de controle para monitorizar os parâmetros do processo.

A Figura 1, representa esquematicamente um sistema de campo elétrico pulsado no processamento de alimentos (adaptado de Mohamed *et al.* 2012).

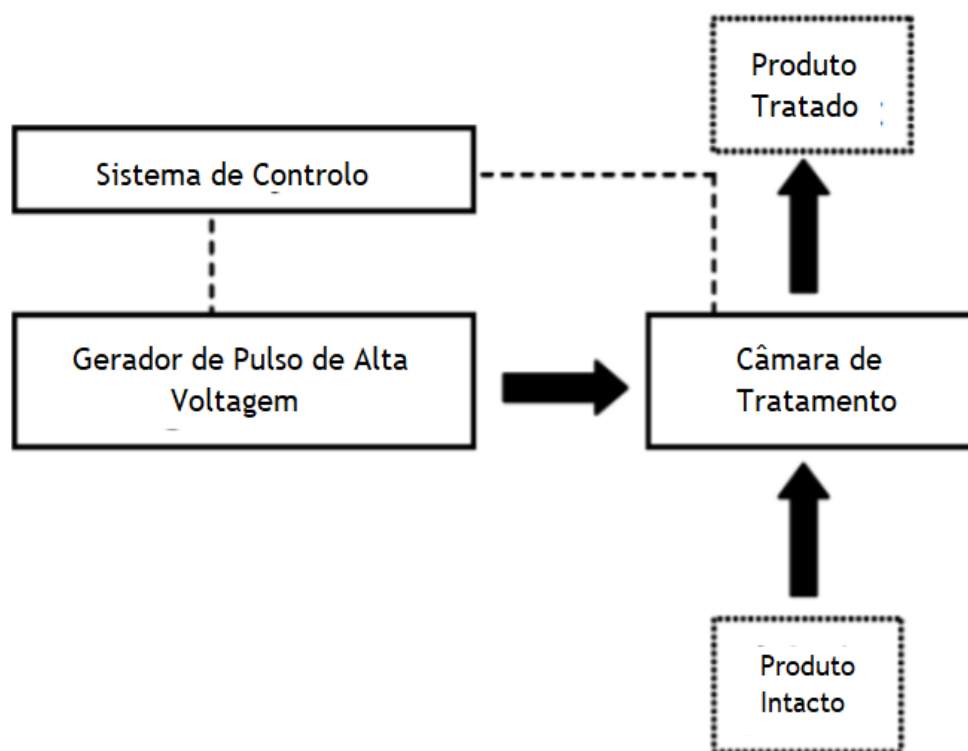


Figura 1- Esquema de um sistema de PEF no processamento de alimentos (adaptado de Mohamed *et al.* 2012).

Como referido anteriormente, a unidade de processamento de alimentos típica para campos elétricos é um sistema composto por uma fonte geradora de pulsos elétricos (fonte de alta voltagem) e uma câmara de tratamento (Wan *et al.*, 2009). Em pormenor, o sistema gerador de pulsos elétricos compreende um gerador de alta tensão, um gerador de pulso, um condensador, um interruptor, resistências elétricas, um osciloscópio para medir a intensidade dos pulsos elétricos gerados e outros componentes eletrónicos comuns a sistemas elétricos. Em geral, os pulsos elétricos formados podem possuir a forma de uma onda quadrada ou exponencial, e podem ser unipolares ou

bipolares em equipamentos mais modernos (Mohamed *et al.*, 2012), como se observa nas figuras 2 e 3.

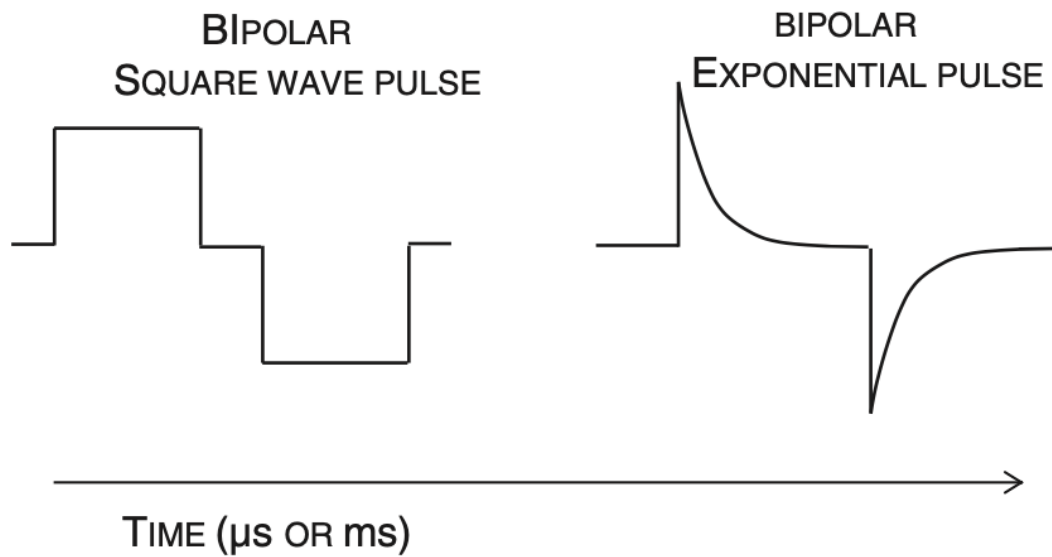


Figura 2 - Formas de onda de pulso elétrico no tratamento PEF: Pulso quadrado e exponencial (adaptado de Raso et al., 2016).

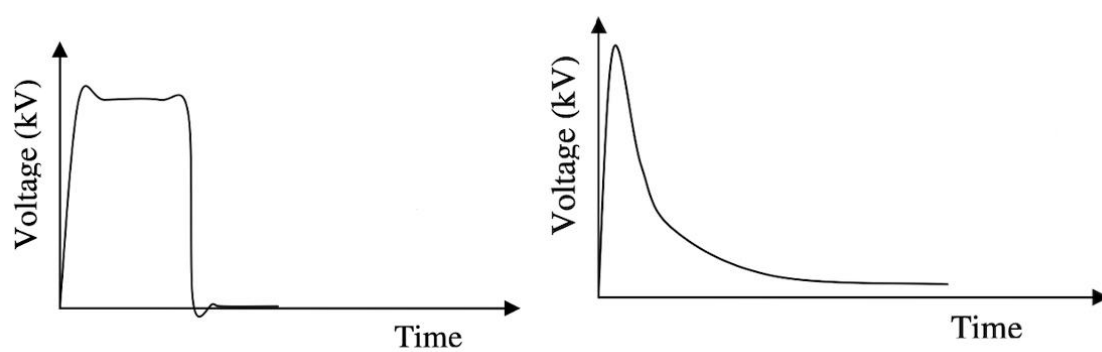


Figura 3 - Formas de onda unipolar de pulso elétrico no tratamento PEF: Pulso quadrado e exponencial (adaptado de Altunakar, 2007).

A energia da fonte de alimentação é armazenada no condensador e descarregada através da câmara de tratamento, para gerar um campo elétrico no produto alimentar. A tensão

máxima do condensador é igual à tensão no gerador e o banco de condensadores é carregado por uma fonte de alimentação de corrente contínua obtida de uma fonte principal de corrente alternada amplificada e retificada. O interruptor elétrico é usado para descarregar a energia, instantaneamente, armazenada no banco de armazenamento, que passa através dos alimentos mantidos na câmara de tratamento (Mohamed *et al.*, 2012).

No caso de sistemas contínuos, é usada uma bomba para transportar os líquidos através da câmara de tratamento. Pode ser usado um sistema de refrigeração de câmara para diminuir eventuais efeitos de aquecimento e controlar a temperatura dos alimentos durante o tratamento. As sondas de alta tensão e corrente podem ser usadas para medir a tensão e a corrente fornecida à câmara e podem funcionar como dispositivos de proteção (Mohamed *et al.*, 2012).

2.3 Variáveis do processo no tratamento PEF

A tecnologia PEF apresenta variáveis associadas ao funcionamento do equipamento, que, por sua vez, influenciam o resultado no produto alimentar.

Nas secções seguintes descrevem-se as principais variáveis associadas ao funcionamento do equipamento PEF, em processamentos batch.

a) Intensidade do campo Elétrico (E)

A intensidade do campo elétrico está dependente das seguintes variáveis: a tensão aplicada entre os elétrodos, a geometria da câmara de tratamento e a distribuição espacial das propriedades dielétricas do material a tratar. A distribuição da intensidade do campo elétrico dentro da câmara de tratamento deve ser o mais homogénea possível, para permitir ter uma quantificação mais exata da intensidade real aplicada, assim como para garantir que todo o produto é sujeito ao mesmo nível de tratamento. A intensidade do campo elétrico pode ser estimada dividindo a tensão (U) medida através dos elétrodos da câmara de tratamento pela distância dos elétrodos (L), como se verifica na equação (1) (Raso *et al.*, 2016).

$$(1) \ E = \frac{U}{L}$$

b) Formato e Largura do Pulso (τ)

As formas de pulso mais utilizadas são os pulsos de onda quadrada e os pulsos de decaimento exponencial. O tamanho do pulso é definido como o tempo em que a intensidade do campo elétrico máxima é mantida para pulsos de onda quadrada ou o tempo até à perda de 37% da intensidade máxima para pulsos de decaimento exponencial (Toepfl, 2006).

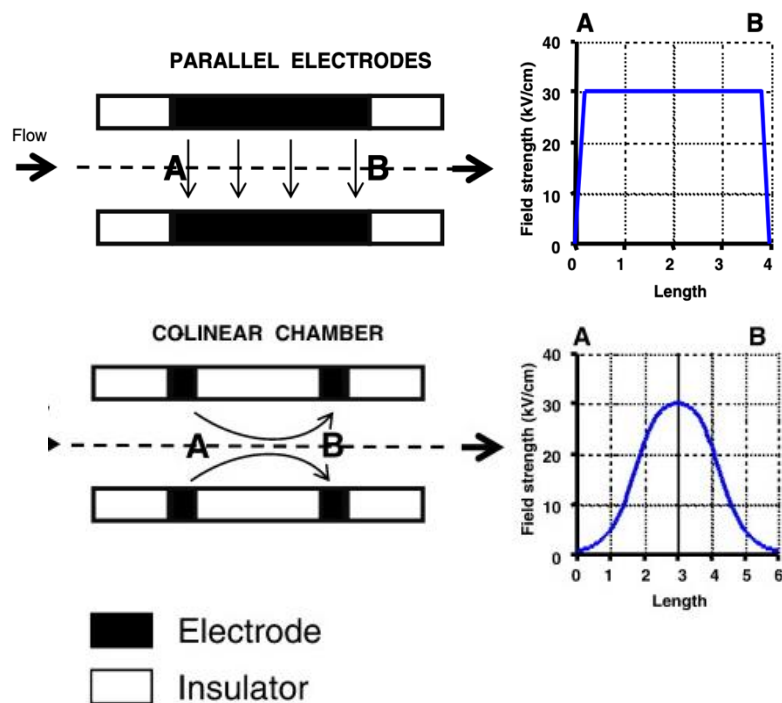


Figura 4. - Esquema da configuração dos eletrodos na câmara de tratamento e exemplo do pulso formado (adaptado de Raso et al., 2016).

Nos pulsos de onda quadrada a tensão máxima e a intensidade do campo elétrico permanecem constante durante a duração do pulso. Nos pulsos de decaimento exponencial, a tensão aumenta exponencialmente para um pico e diminui para zero (Altunakar, 2007).

c) Energia Específica (W)

A energia específica consiste na energia elétrica de alta tensão aplicada por unidade de massa, esta medida permite avaliar os custos energéticos da aplicação do PEF e consequentemente, comparar a eficiência do tratamento com outras tecnologias. Esta variável depende da tensão aplicada, largura de pulso e resistência da câmara de tratamento, que variam de acordo com a geometria e condutividade do material tratado (Raso *et al.*, 2016).

d) Frequência (f)

A frequência indica o número de pulsos aplicados por unidade de tempo. O valor da frequência de pulso (Hz) é importante, pois determina a quantidade de energia elétrica fornecida por unidade de tempo no produto, colocado no interior da câmara de tratamento (Raso *et al.*, 2016).

2.4 Vantagens da técnica PEF

O processamento alimentar por PEF tem elevado interesse em processamento alimentar, nomeadamente na otimização de processos de extração por difusão, tratamento osmótico, extração por prensagem, secagem e congelamento, inativação microbiana, entre outros.

As principais vantagens do processamento por PEF em relação aos tratamentos convencionais, descritas por Barba *et al.*, são:

- Aumento da transferência de massa;
- Melhor rendimento de extração;
- Diminuição do tempo de processamento;
- Redução da degradação dos compostos sensíveis ao calor (compostos aromáticos, proteínas);
- Redução dos custos de energia e do impacto ambiental (Barba *et al.*, 2015).

O PEF é um método de processamento não térmico que altera a permeabilização da membrana num período muito curto de tempo (deixando a matriz do produto praticamente inalterada, com incremento da transferência de massa no processamento

subsequente de alimentos (Ade-Omowaye *et al.*, 2001). Os campos elétricos pulsados permitem também a conservação de alimentos através da inativação de microrganismos e enzimas (Huang *et al.*, 2014). A largura e frequência do pulso, diferença de potencial entre elétrodos e caudal em tratamentos contínuos afetam diretamente a viabilidade dos microrganismos, minimizando os efeitos adversos do processamento térmico e preservando as características naturais dos alimentos. Além disso, a tecnologia oferece vantagens como baixo custo de processamento, maior eficiência energética e sustentabilidade ambiental (Arshad *et al.*, 2020; Soltanzadeh *et al.*, 2022).

Como referido anteriormente, o processo de PEF utiliza voltagens pulsadas em intervalos de tempo muito curtos, provocando efeitos de aquecimento muito reduzidos. (Raso *et al.*, 2016). Durante o processo de tratamento, pode resultar o aquecimento dos alimentos a temperaturas ligeiramente acima da temperatura ambiente, mas não ocorrem reações inerentes à utilização de elevadas temperaturas, dando origem a alimentos com as características originais minimamente alteradas, após o processamento. Em comparação com outras técnicas térmicas, o PEF tem a vantagem de permitir o processamento dos alimentos de um modo contínuo em poucos segundos e com reduzido consumo energético. Devido a estas características, esta técnica de processamento é altamente apelativa para a indústria alimentar, onde encontram diversas aplicações (Toepfl *et al.*, 2006). Apesar dos investimentos necessários na tecnologia PEF, a combinação de tratamentos térmicos com PEF tem sido sugerida como uma estratégia para aumentar sua eficácia e reduzir os custos energéticos (Guerrero-Beltrán *et al.*, 2010).

A tecnologia PEF pode ser usada para obter processos mais eficientes em termos energéticos, ambientalmente mais amigáveis e com baixa manutenção mecânica, o que num curto prazo pode amortizar a aquisição do equipamento. Neste sentido, o uso de PEF e/ou em combinação com extração aquosa suplementar ou solventes verdes (etanol ou dimetilsulfóxido), pode ser uma tecnologia útil para extrair compostos de valor acrescentado de diferentes matrizes, reduzindo assim a temperatura e o tempo de extração necessários, bem como a quantidade de solventes, aumentando ainda a eficácia do processo do ponto de vista económico (Barba *et al.*, 2015), tal como verificado num estudo recente de Araújo *et al.* (2023), que levou à conclusão de que a aplicação

combinada de PEF e aquecimento moderado foi eficaz na inativação de *Listeria monocytogenes* e *Escherichia coli* no leite de cabra, apresentando-se como uma alternativa promissora ao tratamento térmico tradicional na indústria de laticínios, reduzindo significativamente as necessidades de energia de aquecimento, diminuindo o consumo energético do tratamento térmico em cerca de três vezes.

O uso de PEF tem sido testado em várias matrizes alimentares, como ovos e derivados (Sampedro et al., 2006), bebidas alcoólicas como o vinho e a cerveja (Nannan et al., 2016, Ricci et al., 2018), no processamento de carnes (Tomasevic et al., 2023), e também no queijo (Gentès et al., 2022), contribuindo para a melhoria do seu sabor e textura, contribuindo para o aumento do tempo de prateleira (Barbosa et al., 2023).

2.5. Desvantagens da técnica PEF

O PEF oferece vantagens únicas em relação a outras técnicas, no entanto tem algumas desvantagens.

Atualmente, o processo de conservação por PEF utiliza câmaras de fluxo contínuo e descontínuo, onde o tratamento ocorre previamente ao embalamento, sendo embalada num recipiente totalmente asséptico para evitar contaminações. No caso do PEF aplicado a produtos alimentares previamente embalados, seria dispensável o embalamento asséptico e seriam evitadas contaminações, permitindo facilitar o processo e baixar os custos. A desvantagem inerente a este processo é que não é completamente eficiente a fim de evitar o custo do embalamento asséptico. Além disso, acresce o facto da câmara de tratamento do sistema PEF ter um tempo de vida reduzido devido à corrosão dos eléctrodos, o que aumenta os custos de manutenção do equipamento (Roodenburg *et al.*, 2010).

Em contrapartida, uma embalagem condutora da eletricidade solucionaria todas estas limitações, porém a embalagem adequada a este tipo de processamento ainda não se encontra disponível, sendo necessário o seu desenvolvimento (Aranaz *et al.*, 2012). Além disso, esta técnica não é indicada para alimentos sólidos ou líquidos que contenham bolhas de ar e apresenta baixa eficiência na eliminação dos esporos.

Por outro lado, o facto dos eléktodos estarem em contacto direto com os produtos alimentares levanta ainda questões de segurança alimentar, pois ocorrem reações eletroquímicas entre os eléktodos e os alimentos, sendo que, pode ocorrer o aumento da concentração de alguns metais nos alimentos, após o tratamento por PEF (Roodenburg *et al.*, 2010).

Outra das grandes desvantagens é a sua aplicação individualizada a cada uma das categorias de alimentos e o conhecimento do seu modo de atuação pois cada produto tem as suas condições específicas.

Por fim, o tratamento PEF aplicado isoladamente pode ser insuficiente para algumas aplicações de processamento de alimentos. Além disso, o equipamento PEF com potências elevadas pode destruir as membranas microrges, remover o componente turbor celular da textura e exercer uma elevada influência nas propriedades viscoelásticas do tecido vegetal (Lebovka *et al.*, 2004).

Embora, como referido anteriormente, restrito a produtos alimentares sem bolhas de ar e com baixa condutividade elétrica (Mohamed *et al.*, 2012).

2.6. Fatores que influenciam o efeito dos PEF

Existem vários fatores que podem afetar a eficiência da aplicação desta técnica, entre elas, o tipo de câmara e as características do pulso. Os fatores com maior relevância são as características elétricas do alimento, a intensidade do campo elétrico aplicado, a duração do tratamento, a temperatura de tratamento, o tipo e forma de microrganismo ou enzimas e o pH do meio. Assim, é importante verificar qual o tipo de microrganismos e enzimas de interesse (Bendicho *et al.*, 2002; Petit *et al.*, 2002). O mecanismo pelo qual os microrganismos são inativados pelo tratamento com PEF é a ruptura elétrica da membrana celular, que age como um condensador preenchido por um meio dielétrico (Zimmermann *et al.*, 1974).

Relativamente à intensidade do campo elétrico, existem dois valores fundamentais: caso seja muito baixo, não será capaz de inativar os microrganismos, enquanto que se for

muito elevado, poderá causar rutura dielétrica no alimento em simultâneo com a inativação microbiana (Garcia *et al.*, 2005).

Em relação à temperatura do tratamento, quanto maior for o valor, mais eficaz será o tratamento. Contudo, o objetivo principal desta tecnologia tem sido substituir o tratamento térmico, por isso as câmaras normalmente possuem um sistema de arrefecimento e a temperatura é mantida, na maioria das vezes, abaixo de 40 °C. Relativamente ao pH, a relação é inversa, isto é, quanto menor o seu valor, maior a eficácia do tratamento (Garcia *et al.*, 2005).

2.7 Aplicação da técnica PEF em alimentos

O crescente interesse do consumidor por produtos alimentícios frescos e nutritivos, juntamente com a procura por tecnologias de processamento ambientalmente menos poluentes, tem levado ao desenvolvimento de tecnologias emergentes não térmicas, como os campos elétricos pulsados (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009). Nos últimos anos, muitos investigadores têm realizado diversos estudos no uso desta técnica no processamento de alimentos. Muitos desses estudos envolvem a utilização de campos elétricos pulsados como substituto da pasteurização ou esterilização de alimentos líquidos (Fincan and Dejmek, 2002).

O tratamento com campos elétricos pulsados tem cada vez maior interesse no processamento de alimentos, desde a inativação de microrganismos, ao aumento de extração de compostos, intensificação da desidratação de alimentos e secagem (Lebovka *et al.*, 2004), bem como em fenómenos de transferência de massa em alimentos e processos biotecnológicos, como a secagem, tratamento osmótico, congelamento, extração e difusão (Raso *et al.*, 2016).

A sua aplicação tem demonstrado sucesso na pasteurização de alimentos como sumos, leite, iogurte, sopas e ovos líquidos.

Esta tecnologia também é aplicada no aumento da extração de açúcares e outros componentes celulares das células vegetais, como na beterraba. Jemai *et al* 2006 demonstrou a eficiência da aplicação dos campos elétricos pulsados em beterrabas,

como pré-tratamento seguido de várias prensagens, com o objetivo de aumentar a permeabilidade da maioria das membranas celulares, conduzindo a uma maior extração de sumo intracelular e melhor qualidade (Jemai *et al.*, 2006).

Segundo Finca *et al.*, 2004, a desintegração da membrana celular no tecido vegetal pela aplicação de pulsos elétricos, é uma etapa de pré-tratamento não térmico para aumentar a eficiência de extração do líquido intracelular e facilitar a secagem de frutas e vegetais. A aplicação desta tecnologia às células, conduz à formação de poros na membrana como resultado da polarização de iões na membrana, aumentando a permeabilidade das células vegetais.

No que se refere a sumos de frutas, este processo tem sido bem-sucedido devido à baixa viscosidade e condutividade elétrica, como no caso do sumo de laranja e maçã. Além disso, em sumos com prazo de validade alargado, a mudança de cor não escurece tanto comparativamente à aplicação das outras técnicas. Este escurecimento é normalmente associado à conversão do ácido ascórbico em furfural (Mohamed *et al.*, 2012).

Esta técnica também pode ser utilizada na extração de compostos bioativos, tais como compostos fenólicos, isoprenóides, vitaminas, pigmentos e polissacarídeos de diversas matrizes alimentares ou para induzir ou modificar a expressão destes compostos bioativos (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009).

Por outro lado, a aplicação de PEF como pré-tratamento na desidratação de produtos alimentares como frutos e vegetais tem apresentado bons resultados. O tratamento por PEF facilita a saída de água durante a desidratação osmótica e limita a entrada de solutos nas células, alterando minimamente as propriedades dos alimentos desidratados. Este pré-tratamento aumenta ainda a taxa de desidratação, aumentando o rendimento.

Alguns produtos podem voltar a ser rehidratados, tendo-se verificado que o pré-tratamento por PEF também melhora as condições deste processo (Ade-Omowaye *et al.*, 2001).

Estudos mais recentes envolvendo a aplicação de PEF em produtos alimentares, como a batata ou a beterraba, levaram a resultados que confirmam as vantagens da aplicação desta tecnologia. A combinação de pré-tratamento com PEF na fritura de batata juntamente com ultrassons, resultou numa redução significativa no conteúdo de

acrilamida, permitindo um melhor controlo da produção e das especificações do produto (Ostermeier *et al.*, 2021). Ainda na produção de batatas fritas, verificou-se que a intensidade do campo elétrico tem um efeito significativo na diminuição de teor de óleo e na textura das batatas fritas, tornando a superfície das batatas mais lisa, aumentando a porosidade e reduzindo 21,2% do teor de óleo, melhorando assim a dureza e crocância a nível sensorial (Zhang *et al.*, 2021). Outro estudo elaborado por Abduh (2019), demonstrou que a aplicação de PEF não altera as propriedades do amido dentro das batatas, diminuindo a temperatura de gelatinização, confirmando-se que, quando usado como um auxiliar de processamento para a batata, o PEF não resulta em efeitos prejudiciais nas propriedades do amido da batata (Abduh *et al.*, 2019). Também se verificou que o tratamento com PEF acelera a liofilização e afeta o nível final de desidratação, após liofilização prolongada por 24 horas (Liu *et al.*, 2021).

Em relação à beterraba, a maior parte dos estudos que envolvem este alimento com PEF envolvem a extração de compostos bioativos. Um estudo demonstrou que a aplicação do pré-tratamento com PEF influenciou significativamente a eficiência de extração dos compostos bioativos da beterraba (Nowacka *et al.*, 2019). O tratamento com PEF mostrou ser eficaz no aumento da extração de betalaínas e na redução do tempo de extração, sendo a eletroporação responsável pelo aumento da quantidade de corantes por extração aquosa (Loginova *et al.*, 2011).

2.8 Efeitos do tratamento PEF na textura

Geralmente, as propriedades texturais de um tecido vegetal estão relacionadas com a estrutura e morfologia do tecido, dimensões celulares, arranjo do espaço intercelular e presença de amido ou outros constituintes (Lebovka *et al.*, 2004).

Como referido anteriormente, o tratamento PEF causa rutura não térmica das membranas celulares e diminuição ou perda do componente de turgor das células. Apesar da perda na firmeza da estrutura do tecido, induzida pelo PEF, as propriedades de textura não são alteradas, principalmente em alimentos com maior teor de amido (Lebovka *et al.*, 2004). Comparativamente às restantes aplicações (tratamentos térmicos), a tecnologia PEF é menos destrutiva relativamente às propriedades de textura,

mais eficiente na aplicação do processo de prensagem, com obtenção dos sumos do produto de elevada pureza com um consumo mínimo de energia. (Lebovka *et al.*, 2004).

Segundo um estudo de Lebovka *et al.*, 2004), refere que este método tem influência na textura dos alimentos hortícolas (batata, maçã e cenoura), tais como:

- Firmeza;
- Amolecimento/dureza;
- Descoloração/escurecimento;
- Inativação dos microrganismos do alimento;
- Aumento do prazo de conservação dos alimentos em comparação com alimentos sem tratamento.

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo, é apresentado o material utilizado na preparação das amostras e as condições dos ensaios realizados na tecnologia PEF, bem como os métodos analíticos usados na caracterização das amostras antes e após tratamento.

3.1 Batata

O género *Solanum*, da família Solanácea, contém mais de 2.000 espécies, incluindo beringela e tomate, embora somente cerca de 150 produzam tubérculos. A batata é uma boa fonte de vitaminas, destacando-se o teor de vitamina C e minerais, tais como potássio, fósforo, magnésio e cálcio.

A estrutura externa é representada pelo gomo apical na extremidade apical do tubérculo e pela periderme. Na periderme existem pequenas depressões denominadas por olhos. Por outro lado, podem surgir lentículas que são pequenas aberturas permitindo a ocorrência de trocas gasosas com o exterior (Arce, 2002). Em contrapartida, a estrutura interna é composta por diferentes tecidos distintos: córtex ou parênquima cortical, anel vascular, região perimedular e medula ou parênquima medular (Arce, 2002).

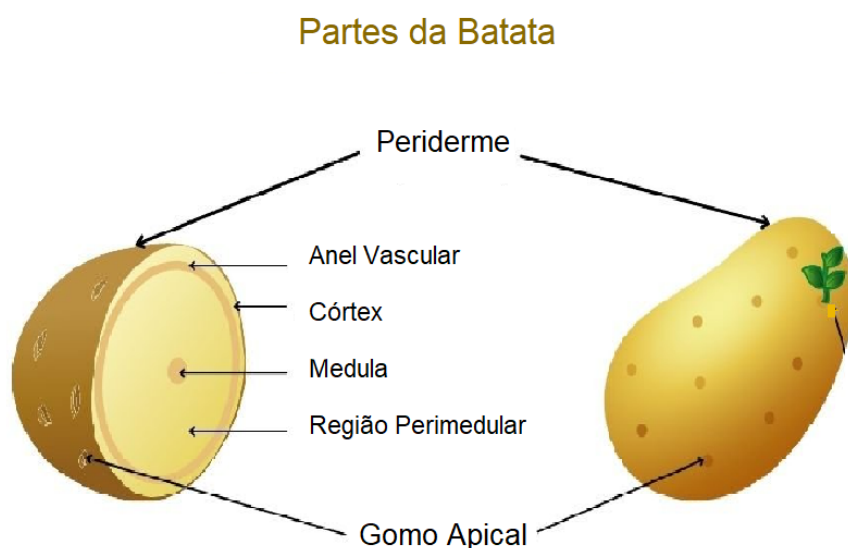


Figura 5 - Diferentes partes da Batata (adaptado de Flourishingplants 2022).

A batata é um alimento composto por cerca de 80% de água, sendo os restantes 20% sólidos. Os sólidos dividem-se maioritariamente em cerca de 18% de glícidos (açúcares) e 2% de proteínas, entre outros compostos, tal como se pode observar na tabela 1.

Tabela 1. Composição da batata. Fonte: Instituto Nacional Dr. Ricardo Jorge.

Componente	Unidade	Valor por 100g
Água	g	81.6
Proteína	g	0.6-2.1
Lípidos totais	g	0.075-0.2
Fibra	g	1-2
Polifenóis	mg	123-441
Glícidos		
Amido	g	12.6-18.2
Açúcar totais	g	1.15
Glucose	g	0.01-0.6
Frutose	g	0.01-0.6
Sacarose	g	0.13-0.68

3.2 Beterraba

A beterraba é conhecida cientificamente por *Beta vulgaris* L. (Moreda, 2021). É considerado um tubérculo, podendo ter cerca de trinta centímetros de comprimento e pesar até 2 kg. A maioria deste tubérculo tem coloração escura no exterior e polpa vermelha no interior, contudo existem variedades com polpa branca ou amarelo-ouro (Nolte, 2009).

A beterraba destaca-se pelos teores de sais minerais e vitaminas A, B1, B2 e C, sendo rica em compostos fenólicos, flavonoides e antocianinas, compostos antioxidantes com funções biológicas importantes, como prevenção de cancro e de doenças cardiovasculares (Ramos *et al.*, 2016). É um alimento com poucas calorias, rico em fibra. Pode ser consumida em cru, cozida, assada ou em conserva (Nolte, 2009).

3.2.1 Utilização de PEF na beterraba

A conservação das propriedades básicas dos alimentos é fundamental para que a textura, cor, pH e açúcares totais permaneçam intactos. Existem diversos métodos de preservar estas características, entre eles o uso de campos elétricos pulsados.

Segundo (Fincan *et al.*, 2004), o tratamento com PEF a 1 kV/cm é um método eficaz na permeabilização para a extração do pigmento da beterraba, com baixo consumo de energia (cerca de 7 kJ/kg). O tratamento facilita a extração do pigmento e iões do tecido. Além disso, a aplicação de PEF pode facilitar a perda de humidade da matriz do alimento, aumentando assim o coeficiente de difusão de água e diminuindo a temperatura de secagem em frutas e vegetais, tais como em beterraba vermelha e batata até 20-25 °C, quando o PEF é aplicado como pré-tratamento, sem qualquer influência na cinética do processo (Barba *et al.*, 2015).

3.3 Matérias-primas

Nas experiências realizadas pela técnica PEF utilizaram-se batatas e beterrabas. As batatas foram provenientes de uma produção biológica local, da variedade monalisa. As beterrabas da variedade vermelha, foram adquiridas na União de Produtores do Norte LDA (UNP). Ambos os produtos foram armazenados num local seco e fresco à temperatura ambiente até ao seu uso.

3.4 Preparação das amostras para análise PEF

Na preparação das amostras seguiu-se o fluxograma de acordo com a figura 6.

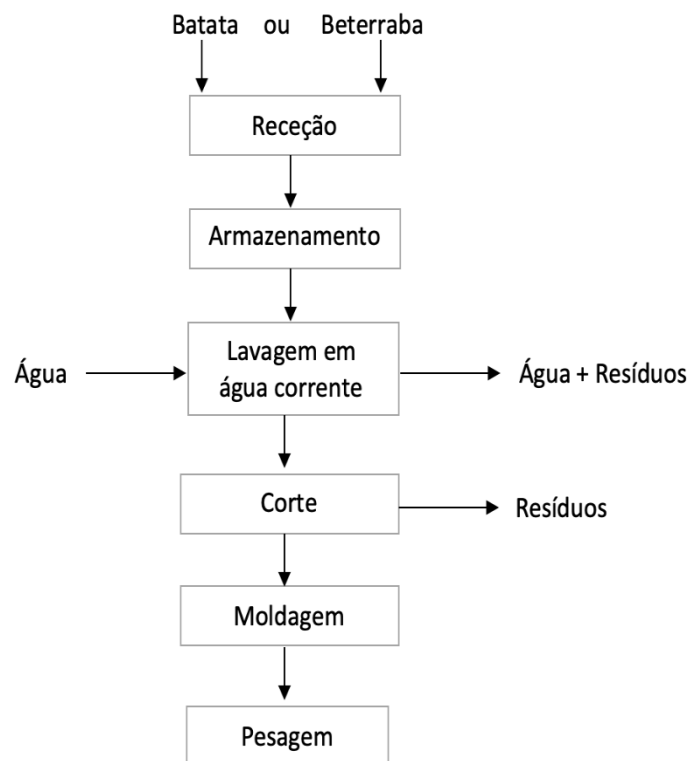


Figura 6 - Fluxograma de preparação das amostras.

Durante a preparação, as amostras foram lavadas com água corrente, e retirados todos os resíduos de terra e poeiras existentes. Após lavagem, as amostras foram cortadas em fatias de 5 mm de espessura numa máquina de corte (Aurea: M250). Após o corte das fatias utilizou-se um molde em forma de círculo (diâmetro de 4,7 cm) de acordo com a figura 7. Todas as amostras foram uniformizadas para este formato e pesadas numa balança analítica (com aproximadamente 10g cada).

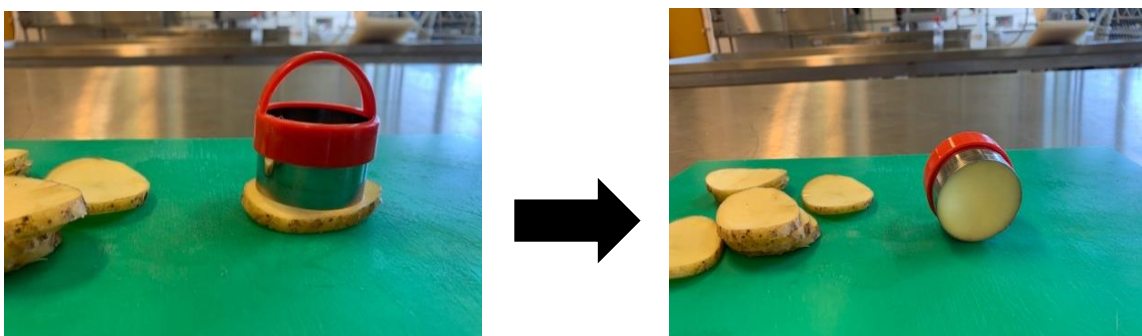


Figura 7. Utensílio de moldagem para a batata e a beterraba.

Para cada ensaio utilizaram-se 2 rodelas ($\cong 20\text{g}$) de massa em meio aquoso (200ml de água) numa proporção de 1:10.

Como controlos, foram preparadas amostras imersas em meio aquoso sem tratamento PEF, figura 8 e 9.

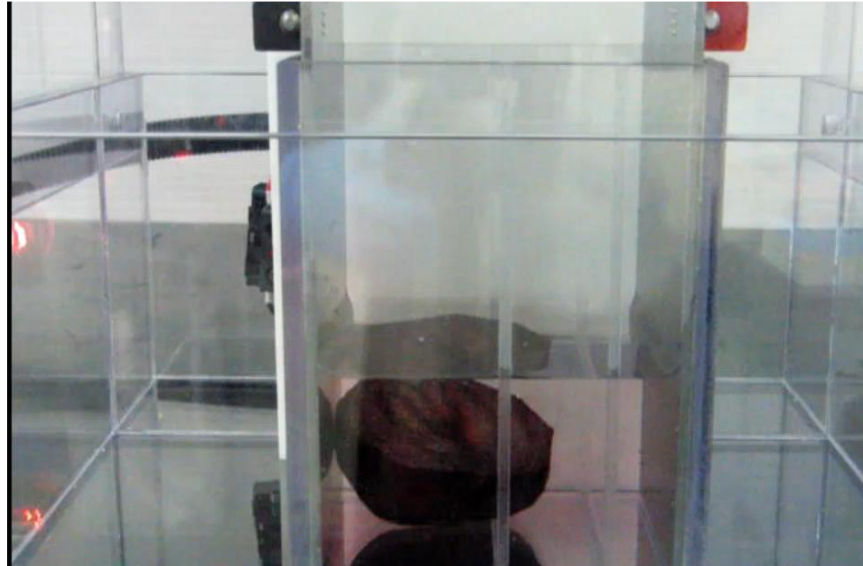


Figura 8. Câmara de tratamento fechada com amostra de beterraba.



Figura 9. Equipamento PEF (à esquerda) e pormenor da câmara de tratamento fechada para processamento em batch.

3.5 Campos elétricos pulsados: condições e equipamento

Todos os ensaios foram realizados no gerador de campos elétricos pulsados EPULSUS®, modelo LPM1A-10, produzido por EnergyPulse Systems, Lda, Lisboa, para aplicações à escala piloto e laboratorial.

O gerador, modelo PM1-10, inclui um modulador Marx positivo, baseado na tecnologia de semicondutores de última geração, projetado para aplicações de energia pulsada em cargas do tipo resistivo. Fornecimento até 10 kV/200 pulsos repetitivos quase retangulares, flexíveis, de onda quadrada até 10 kV / 200 A, com cerca de 250 ns de tensão, frequência máxima e ciclo de serviço limitados pela potência de saída de 3 kW. O gerador PM1-10 inclui uma caixa de segurança, com a possibilidade de incluir câmaras de tratamento contínuo e descontínuo (lote).

Todos os ensaios foram realizados com os elétrodos paralelos distanciados de 10 cm de comprimento, de largura 9,7 cm e de altura 13,2 cm e uma capacidade máxima de 1,28 L, como se pode verificar na figura 8 e 9.

A tabela 2 mostra as condições dos ensaios PEF para as amostras de batata e beterraba:

Tabela 2. Condições PEF para a beterraba e a batata.

Variáveis do processo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Voltagem (V)	1200	5000	7000	10000
Tamanho dos Pulsos (μ s)	200	200	200	200
Frequência (Hz)	50	50	50	50
Nº de Pulsos	200	200	200	200
E [kV/cm]	0,12	0,50	0,7	1,0
top [seg]	4,0	4,0	4,0	4,0
tpef [s]	0,04	0,04	0,04	0,04
Ws [kJ/kg]	0,1	2,5	4,9	10,0

4. Métodos Analíticos

Neste capítulo são descritos os métodos e equipamentos utilizados na análise da textura (compressão e penetração), análise da cor e dos açúcares totais em batata e beterraba.

Na tabela 3 estão descritos os métodos e equipamentos utilizados nos ensaios.

Tabela 3. Métodos e equipamentos utilizados nos ensaios PEF.

Análise	Método	Equipamento	Amostras em estudo	
			Batata	Beterraba
Análise Textura	Teste de compressão	Texturometro (TA.XT. plus) Stable Micro Systems (Goldaming, England) Sonda Cylinder Probe P/75	Sim	Sim
		Sonda Three Point Bend Rigs HDP/3PB	Sim	Sim
	Teste de penetração	sonda cilíndrica P/2	Sim	Sim
Análise Cor	Colorimetria	Colorímetro CHORA METER CR-400	Não	Sim
Análise de Açúcares totais	Espectrofotometria (Técnica de Munson e Walker)	Espectrofotómetro UV-Vis-3100PC	Sim	Sim

4.1. Análise da textura

A textura não é apenas a ausência de defeitos, mas um atributo de qualidade na avaliação de frescura dos produtos, na preparação de alimentos e também contribui para o “prazer de comer” (Szczeniak, 2002). A textura é uma das características de qualidade mais importantes dos alimentos.

A textura dos alimentos tem sido definida como: “todos os atributos reológicos e estruturais do produto (geométricos e de superfície), perceptível através de propriedades mecânicas, táteis e também recetores visuais e auditivos” (Chen and Opara, 2013).

A dureza é um dos parâmetros da análise da textura e é definida como a força máxima durante o ciclo de compressão (Sahin, 2006).

Para análise da textura das amostras de batata e beterraba foi utilizado um texturómetro (TA.XT. plus), Stable Micro Systems (Goldaming, England), equipado com 2 células de carga de 5 kg e 50 kg, para a realização dos ensaios de penetração e compressão, respetivamente. Para tratamento e registo dos dados utilizou-se o software” Exponent”.

4.1.1. Teste de Compressão

Utilizando uma célula de carga de 50kg realizou-se um teste de compressão utilizando uma sonda Cylinder Probe P/75 em aço inoxidável, como se demonstra na figura 10.



Figura 10. Texturómetro com a sonda Cylinder Probe P/75.

A realização deste teste permite determinar a firmeza através da força máxima expressa em Newton (N). Simultaneamente, foi possível avaliar a quantidade de exsudado libertado da amostra durante o teste de compressão, utilizando papel de filtro na

superfície e na base da amostra e medindo a diferença de peso antes e após o ensaio, como se mostra na figura 11.



Figura 11 - Ensaio com a sonda Cylinder Probe P/75 e amostra em análise.

O procedimento consistiu em pesar a amostra e o papel de filtro antes e após o ensaio de compressão. A textura das amostras foi avaliada em 10 réplicas para cada ensaio, com uma velocidade pré teste de 5,0 mm/s, velocidade de teste de 0,1mm/s, uma velocidade pós teste de 10,0mm/s, até uma compressão com força máxima de 100 N. O anexo I refere as condições de análise de textura para o teste de compressão com a sonda cylinder probe P/75.

Realizou-se também o teste uniaxial de compressão utilizando uma sonda *Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Fracture and bending)* e uma célula de carga de 5kg como se mostra na figura 12. No anexo II, referem-se as condições de aplicação do teste uniaxial de compressão com a sonda *Three Point Bend Rigs*. A textura das amostras foi analisada em 10 réplicas para cada ensaio, com uma velocidade pré teste de 10mm/s, percorrendo uma distância de 15mm e uma velocidade pós teste de 10,0mm/s, até uma compressão com força máxima de 50 N.



Figura 12. Ensaio com a sonda Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell) com amostra de beterraba.

Através deste teste, foi possível determinar a força máxima necessária durante a deformação da amostra e avaliar as diferenças das amostras com e sem aplicação de PEF.

4.1.2. Teste de Penetração

Para cada análise realizaram-se 5 perfurações na mesma amostra de acordo com a figura 13, perfazendo um total de 10 perfurações em cada ensaio (2 amostras).



Figura 13. Exemplos de perfurações da sonda cilíndrica P/2 na batata e beterraba.

O teste de penetração foi realizado com recurso a uma sonda cilíndrica P/2 (diâmetro de 2 mm) em aço inoxidável e com uma célula de carga de 5kg, como se observa na figura 14. O anexo I, refere as condições de avaliação da textura com a sonda P/2 no teste de penetração. As condições de teste realizaram-se com uma velocidade pré teste de 5,0 mm/s, uma velocidade pós teste de 10,0mm/s, com uma força máxima de 50 N.

Este teste foi realizado para avaliar a resistência que as amostras apresentam à perfuração com uma determinada força, com uma velocidade constante pré-definida de 1mm/seg e uma distância de penetração de 3,0 mm.

A avaliação da textura deste teste teve como objetivo de comparar as alterações na dureza/firmeza do produto com e sem aplicação PEF.

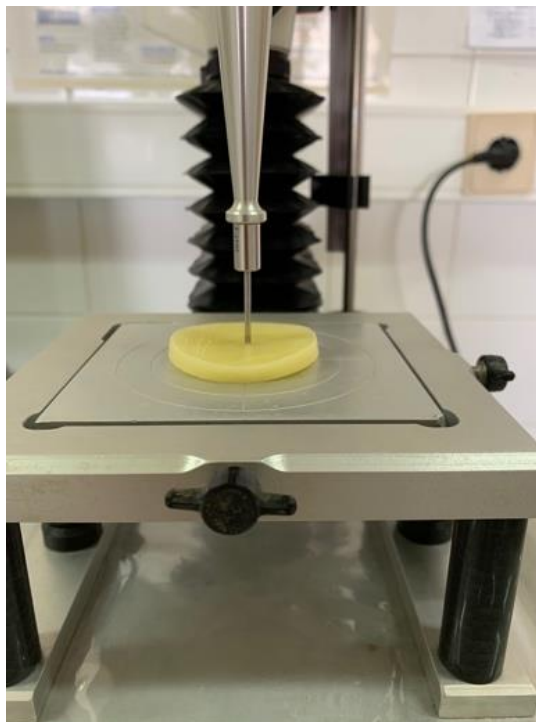


Figura 14. Teste de penetração com a sonda P/2 com amostra de batata.

4.2 Determinação da cor por colorimetria

Para a determinação da cor das amostras utilizou-se um colorímetro CHORA METER CR-400 (Konica Minolta, USA) e o sistema CIE $L^* a^* b^*$. O parâmetro L^* representa a luminosidade (de 0 - preto a 100 - branco), o parâmetro a^* , representa a variação no eixo verde/vermelho e o parâmetro b^* , a variação no eixo azul/amarelo (Figura 15).

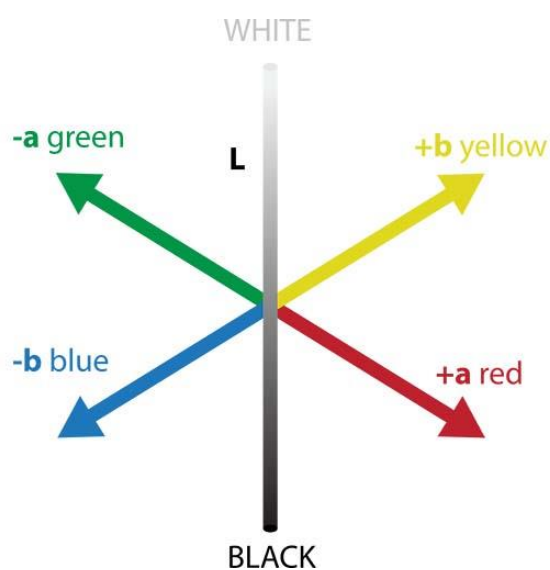


Figura 15. Figura 15 – Gráfico CIELAB Color Space (Fonte: datacolor.com).

Previamente à determinação da cor das amostras, procedeu-se à calibração do colorímetro. Realizando 10 leituras numa amostra sem tratamento PEF. A determinação por colorimetria ocorreu nas amostras sólidas e no líquido.

Nas amostras de beterraba foram efetuadas dez leituras. A partir dos valores obtidos, determinou-se a diferença total de cor obtida através da equação: $\Delta E^* = [\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2]^{1/2}$, onde $\Delta L^* = L_0 - L$; $\Delta a^* = a_0 - a$ e $\Delta b^* = b_0 - b$, sendo L_0 , a_0 e b_0 as coordenadas correspondentes ao alimento inicial e L , a e b correspondentes às coordenadas da cor das amostras de alimentos após o processo (CIE, 2004).

4.3 Determinação dos açúcares totais

A espectrofotometria é um método de análise que utiliza um espectrofotômetro para medir quantitativamente a absorção de luz pelas soluções em estudo, baseando-se no princípio de que a concentração da solução absorvente é proporcional à quantidade de luz absorvida (Lei de *Lambert-Beer*). A absorvância refere-se à medida da luz absorvida, sendo medida pela redução da intensidade da luz transmitida e, através da equação da Lei de *Lambert-Beer*, permite calcular a concentração de luz transmitida de determinada amostra (Ninfa *et al.*, 1998).

De forma a otimizar a determinação da cor da beterraba em meio aquoso, foi realizado um varrimento entre os comprimentos de onda 280-800nm, (espectrofotômetro modelo UV-Vis-3100PC, VWR), para determinar o comprimento de onda (λ) máximo de absorção. O comprimento de onda máximo de absorção foi registado no comprimento de onda 540nm (visível). Assim, todas as leituras foram realizadas a 540nm.

Os açúcares totais foram determinados a partir do método espectrofotométrico segundo a técnica de *Munson e Walker*, utilizando como referência a NP 1419:1987. Previamente à determinação dos açúcares por espectrofotometria efetuou-se a inversão dos açúcares totais e posterior determinação. Foram efetuadas leituras em triplicado em cada uma das soluções após tratamento PEF, utilizando como branco uma amostra em solução sem tratamento PEF.

5. Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação de campos elétricos pulsados (PEF) em beterraba e batata.

5.1. Beterraba

5.1.1. Teste de Penetração

O teste de penetração em beterraba foi realizado com recurso a uma sonda cilíndrica P/2, tal como descrito na secção 4.1.2, tendo os resultados da Figura 16.

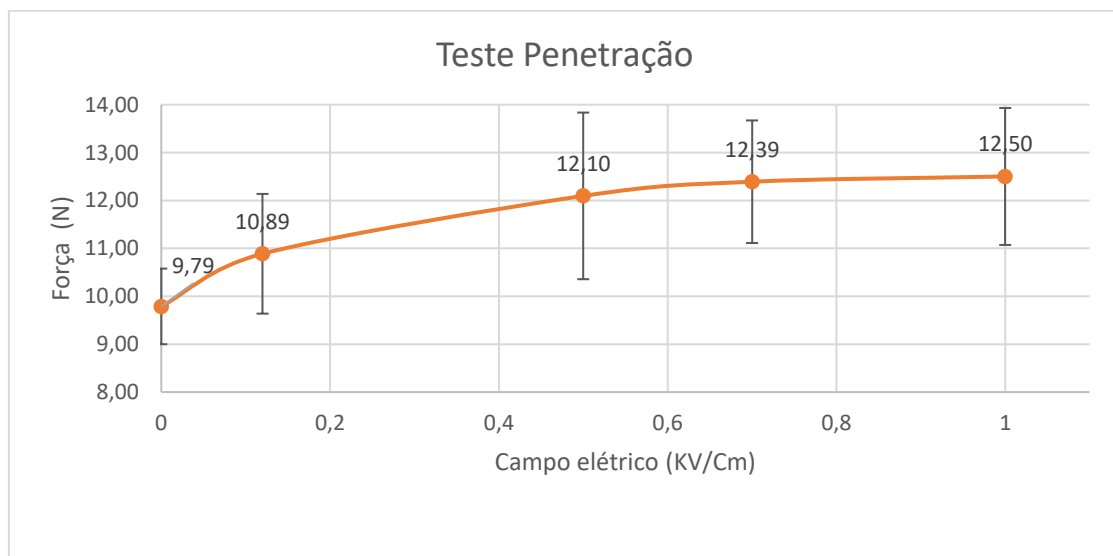


Figura 16. Força máxima em função do campo elétrico em beterraba.

Analisando a figura 16, verifica-se que a força máxima varia entre 9,79 Newton e 12,50N, sendo proporcional ao aumento do campo elétrico. De fato seria esperado o contrário, mas os resultados mostram que entre os valores de 0 e 1 KV/Cm os valores apresentam uma tendência muito ligeira de aumento, mas não significativa. Estas diferenças poderão ser justificadas pela grande heterogeneidade das amostras de beterraba.

5.2.1 Teste de Compressão

a) Medição do exsudado com a sonda *cylinder probe* P/75

O teste de compressão foi realizado à beterraba com recurso à sonda *cylinder probe* P/75, tendo como objetivo avaliar a percentagem de perda de exsudado em função do aumento do campo elétrico (KV/cm), pelo efeito de uma força máxima, avaliando assim a firmeza da amostra de acordo com Figura 17. As barras do gráfico referem-se ao desvio padrão que é elevado deve-se ao fato da matéria-prima não ser homogênea.

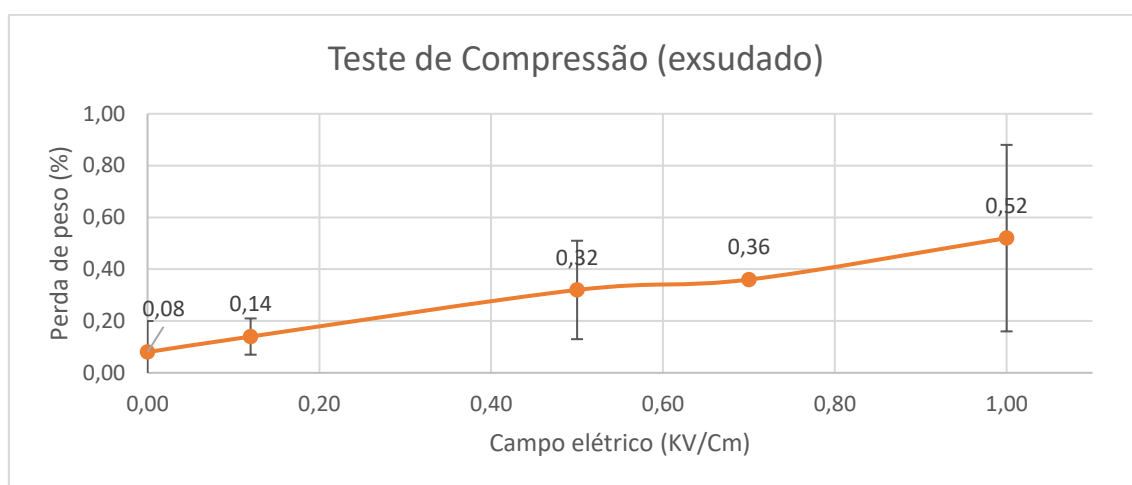


Figura 17 - Perda de peso (%) em função do campo elétrico em beterraba.

Segundo a análise da figura 17, os valores de perda de peso variam entre 0,080% e 0,520%. Pode-se também afirmar que existe pouca diferença entre aplicação do campo elétrico 0,5KV/cm e o 0,7KV/cm, existe também, como seria de esperar, um ligeiro aumento da perda de peso com o aumento do campo elétrico.

O fenómeno de eletroporação pode ser aplicado na otimização dos processos de extração ou absorção, de desidratação e de outros processos de transferência de massa entre a célula e o meio envolvente (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009).

b) Teste de deformação com a sonda *Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell)*.

Foi realizado um teste de compressão à beterraba com recurso à sonda *Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell)*, tendo como objetivo avaliar a deformação da amostra com o aumento do campo elétrico, como se observa na Figura 18. O apêndice II

contém o gráfico da força aplicada no teste de compressão com a sonda *Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell)* em beterraba.

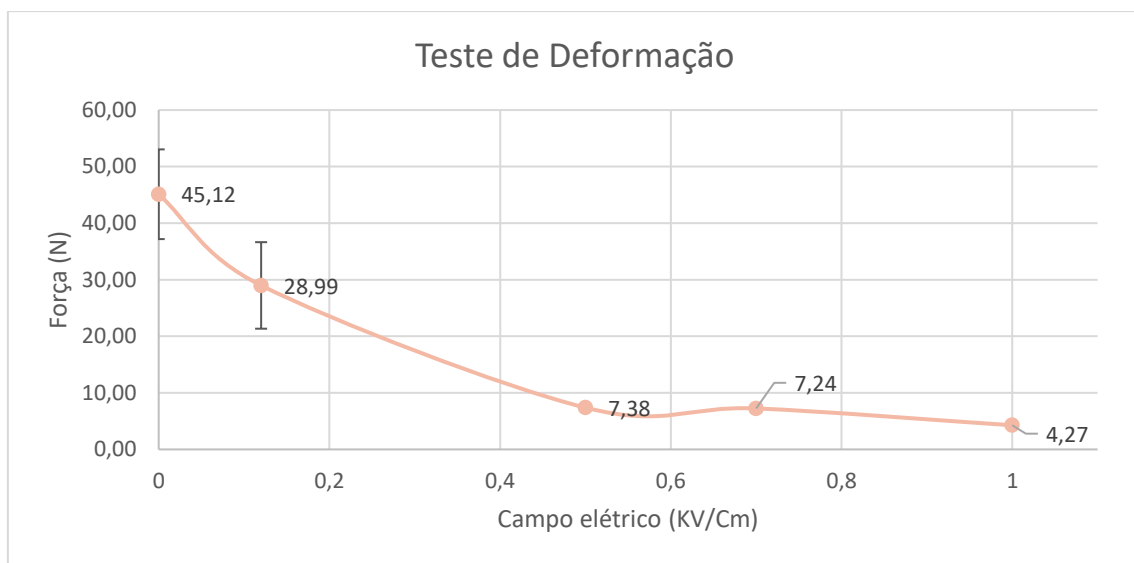


Figura 18. Força máxima em função do campo elétrico em beterraba no teste de compressão.

Segundo a Figura 18, pode-se afirmar que a força máxima expressa em Newton varia entre 45,12 e 4,27 N. Como seria de esperar, existe uma diminuição da força máxima (N) exercida pelo texturômetro com o aumento do campo elétrico (KV/cm) para produzir um determinado efeito de flexão diminui, o desvio padrão tende para zero (daí desaparecer na figura 18, a partir dos 0,5 KV/Cm), existindo uma ligeira oscilação no campo elétrico 0,7 KV/cm. Quanto maior o campo elétrico (KV/cm) menor é a capacidade de resistência á deformação.

Após o tratamento com PEF, os tecidos perderam parte de sua resistência e o módulo de elasticidade quanto a tensão de fratura diminuiu com o aumento do campo elétrico(Lebovka *et al.* 2004).

5.2.2 Açúcares totais

De seguida é apresentada na Figura 19 os resultados da determinação dos açúcares totais em solução em função do campo elétrico

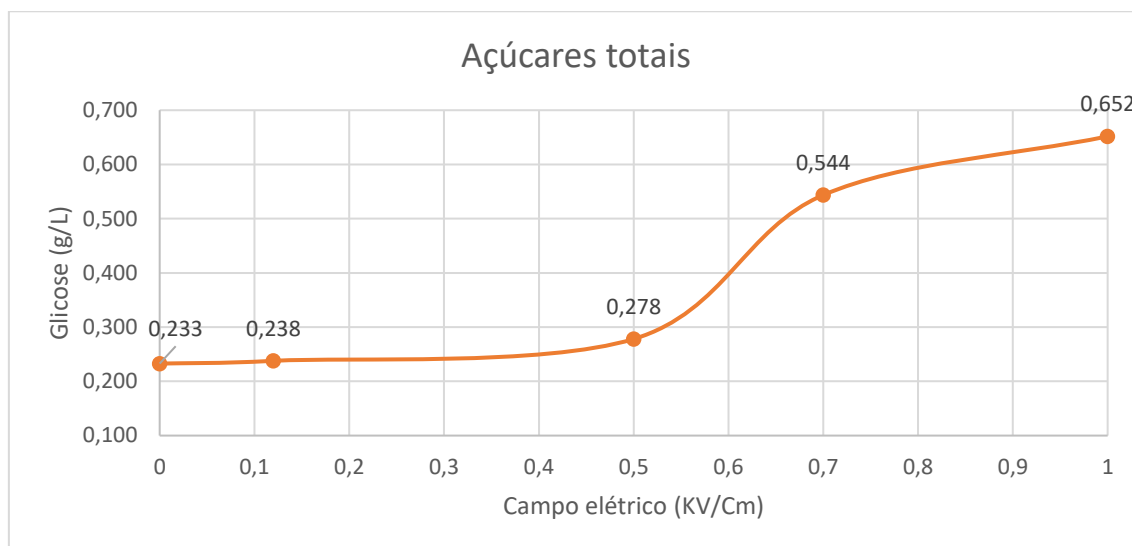


Figura 19. Quantidade de açúcares totais (glicose) em solução em função do campo elétrico nos ensaios em beterraba.

Pelo método de determinação dos açúcares totais em solução, pode-se verificar que existe um ligeiro aumento de libertação de açúcares com o aumento do campo elétrico, apesar de quantitativamente essa diferença ser pouco relevante.

A quantidade de açúcares totais nas amostras sem tratamento PEF é de 0,233g/l (glicose por litro), campo elétrico mínimo (0,12KV/cm) de 0,238g/l e no campo elétrico máximo (1,0KV/cm) é de 0,652 g/l. Através da figura 19, conclui-se que este resultado seria esperado, já que a aplicação do PEF não permite uma quebra dos açúcares maiores (amido) que permanecem no interior da amostra. Verifica-se uma pequena quantidade de açúcares totais não significativa em solução.

Sendo assim, conclui-se que como são diferenças tão pequenas dentro do próprio grupo, as mesmas não chegam a ser relevantes não existem diferenças significativas na quantidade de açúcares (glicose) libertados em solução na beterraba.

5.2.3. Cor

A avaliação da cor foi efetuada de 2 formas distintas, uma diretamente na amostra (amostra sólida) e outra no líquido onde a amostra estava imersa (meio líquido). A determinação da cor da amostra foi determinada por colorimetria. Sendo o valor de LAB respectivamente:

- **L*** = Luminosidade (+L luminoso e -L menos luminoso);
- **a*** = coordenada vermelho/verde (+a indica vermelho e -a indica verde);
- **b*** = coordenada amarelo / azul (+b indica amarelo e -b indica azul).

a) Análise da cor em solução

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos na medição por colorimetria dos parâmetros Lab* na beterraba em função do campo elétrico aplicado e a diferença total de cor obtida através do cálculo da fórmula $\Delta E^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2}$.

Tabela 4. Resultados do parâmetro LAB de cor em meio líquido.*

Colorimetria - meio líquido da beterraba				
E (KV/Cm)	L (solução)	a (Solução)	b (solução)	ΔE
0	19,262	0,345	0,296	
0,12	9,804	0,360	0,279	9,458
0,5	12,860	0,399	0,274	6,402
0,7	8,523	0,409	0,280	10,739
1	6,03	0,507	0,278	13,233

A medição da cor no meio líquido foi efetuada por colorimetria com auxílio de uma caixa de Petri.

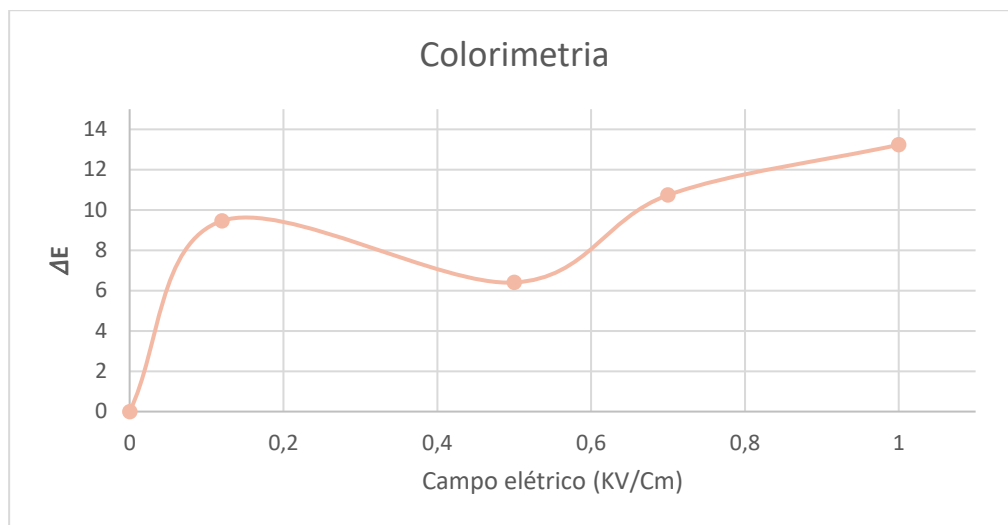


Figura 20 - Variação de cor em função do campo elétrico em meio líquido.

A amostra sem tratamento PEF apresenta uma cor menos luminosa no parâmetro L^* , em relação às amostras com tratamento PEF, que se apresentam mais escurecidas após tratamento por PEF. Nos parâmetros a^* e b^* os valores são semelhantes à amostra sem tratamento PEF, não existindo desvio significativo em relação à cor da beterraba nos parâmetros a^* e b^* .

A Figura 21 mostra as alterações de cor em meio líquido em função do campo elétrico em estudo. As diferenças de cor observadas devem-se ao tratamento com PEF, que provoca a formação de poros na membrana celular, alterando assim a difusão dos meios intra e extracelulares (Janositz et al., 2011).

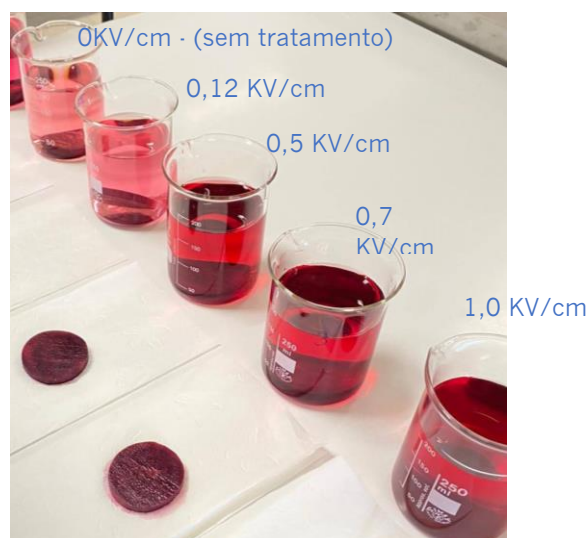


Figura 21. Amostras da solução com beterraba após aplicação de PEF de diferentes intensidades.

Através da figura 21, é visível a alteração da cor em função do aumento do campo elétrico. Quanto maior o campo elétrico aplicado maior a diferença de cor no parâmetro L^* .

b) Análise da cor na beterraba

A Tabela 12 mostra o resultado obtido nos parâmetros de cor na beterraba, em função do campo elétrico aplicado e a diferença total de cor obtida através do cálculo da fórmula $\Delta E^* = [\Delta L^*2 + \Delta a^*2 + \Delta b^*2]^{1/2}$. A medição da cor por colorimetria na rodela de beterraba.

Tabela 5. Parâmetros de cor da beterraba em função do campo elétrico.

Colorimetria – Beterraba				
E (KV/Cm)	L (rodela)	a (rodela)	b (rodela)	ΔE
0	2,773	0,467	0,298	
0,12	2,871	0,486	0,296	0,098
0,5	2,378	0,466	0,292	0,395
0,7	2,279	0,472	0,296	0,494
1	2,192	0,467	0,292	0,581

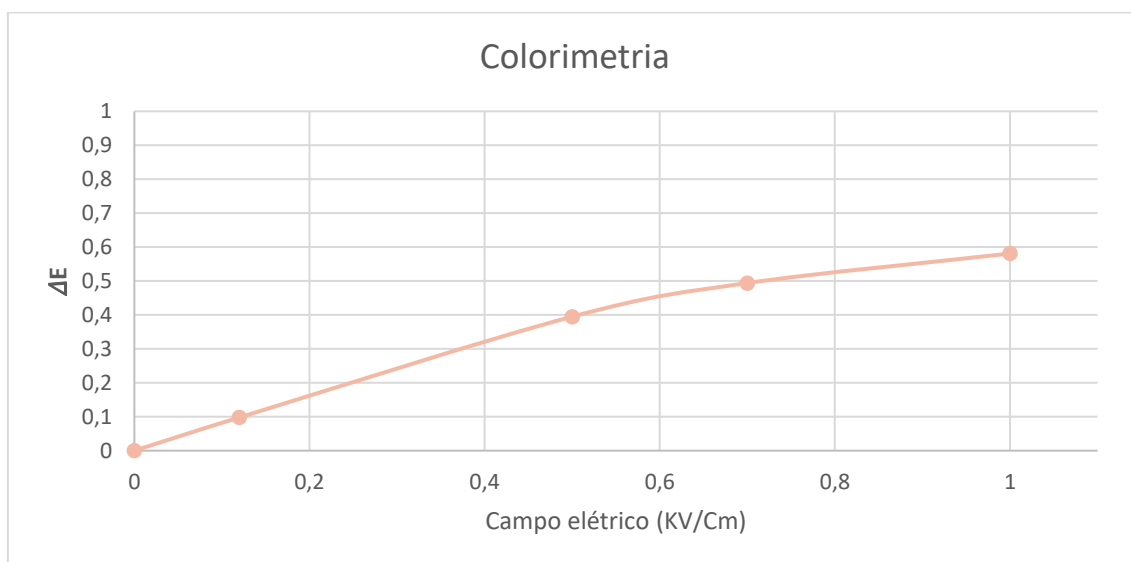


Figura 22. Resultados da variação total de cor em função do campo elétrico nos ensaios em beterraba.

Pela análise dos resultados obtidos, verifica-se que existem diferenças significativas entre os diferentes campos elétricos. Pode-se referir que os parâmetros a^* e b^* são pouco variáveis.

Na Figura 23 apresentam-se as rodela de beterraba após aplicação de tratamento PEF.



Figura 23. Cor da beterraba em função do campo elétrico.

Pela análise da figura 23, observa-se que as rodela da beterraba após tratamento PEF são mais escuras, (visível no parâmetro L^*) do que a amostra sem tratamento PEF. O tratamento PEF escurece as amostras e no campo elétrico mais alto a amostra também foi quebrada.

5.2. Batata

5.2.1. Teste de Penetração

O teste de penetração em batata foi realizado com recurso a uma sonda cilíndrica P/2, de acordo com os resultados da Figura 23.

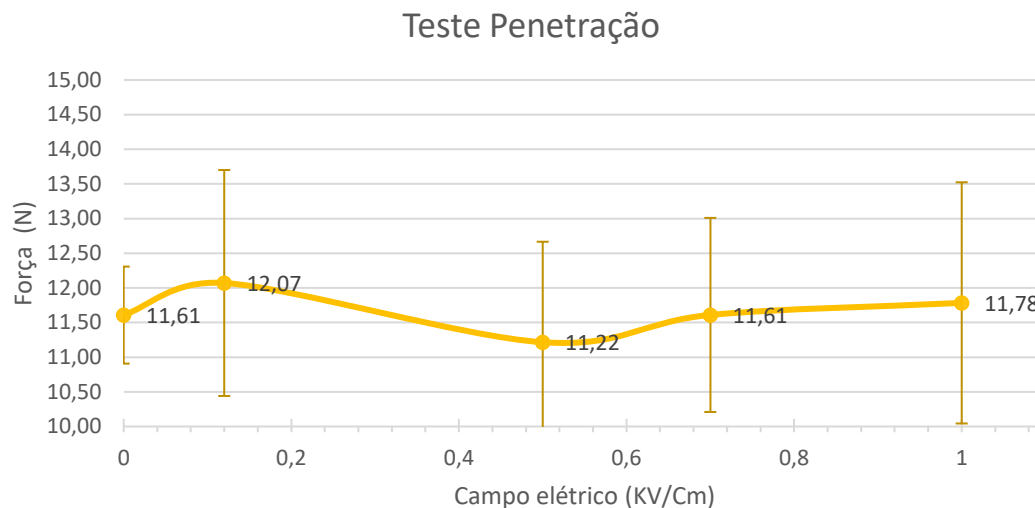


Figura 24. Força máxima (N) em função do campo elétrico na batata.

Através da análise da figura 24, pode-se afirmar que a força máxima varia entre 11,61 Newton e 12,78 N, sendo o valor de 11,61 N de amostra sem PEF e 11,78N com o campo elétrico de maior intensidade. De acordo com a figura 24 pode afirmar-se que nos 5 ensaios realizados que a força máxima não sofreu grandes variações.

5.3.2. Teste de compressão

a) Medição do exsudado com a sonda cylinder probe P/75

O primeiro teste de compressão realizado à batata com recurso à sonda cylinder probe P/75, teve como objetivo avaliar a percentagem de perda de peso exsudado ao longo do aumento do campo elétrico, como mostra a Figura 25.

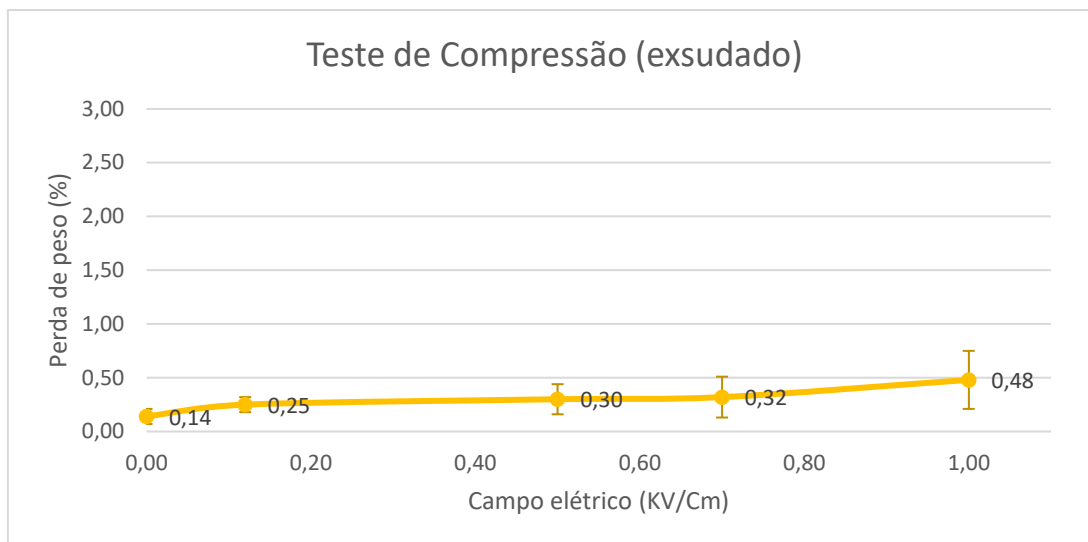


Figura 25. Perda de peso (%) em função do campo elétrico na batata.

Segundo a Figura 25 os valores de perda de peso variam entre 0,14% e 0,48%. Quando maior o campo elétrico maior é a perda de peso na batata, apesar de quantitativamente essas diferenças serem muito pequenas.

b) Teste de deformação com a sonda *Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell)*

O teste de compressão realizado à batata com recurso à sonda *Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell)*, tem como objetivo avaliar a deformação da amostra com o aumento do campo elétrico, como se observa na Figura 26. O anexo II mostra a força aplicada do texturómetro no teste de compressão com a sonda *Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell)* em batata.

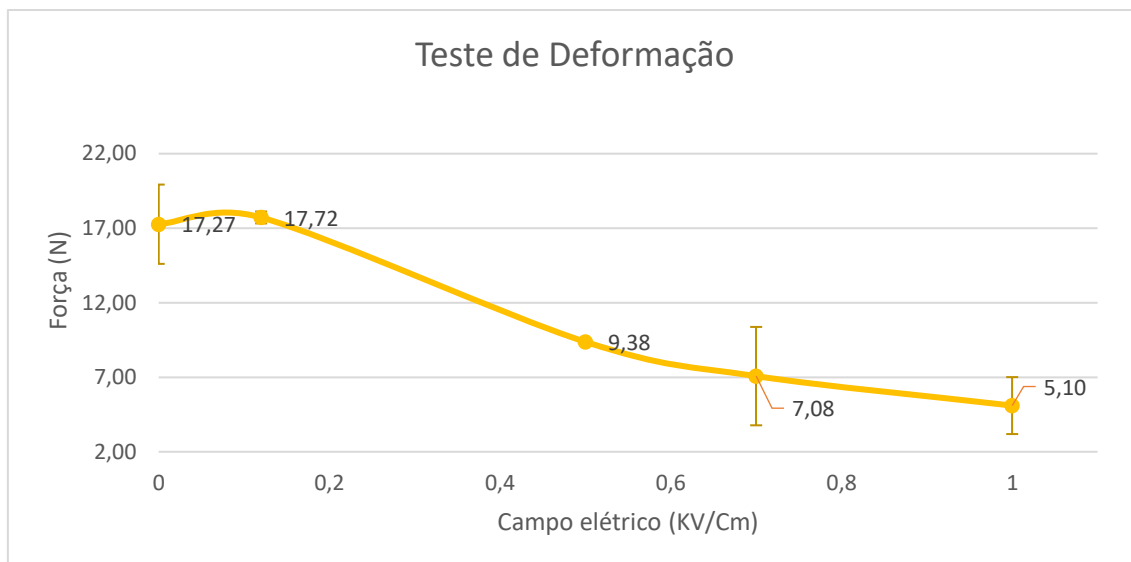


Figura 26 - Força máxima em função do campo elétrico com a sonda Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell) em batata.

Segundo a Figura 26, pode-se afirmar que a força máxima expressa em Newton varia entre 5,10 e 17,27 N. Como seria de esperar, existe uma diminuição da força máxima (N) com o aumento do campo elétrico (KV/cm), pois conforme referido em 2.1.7 e segundo um estudo de Lebovka *et al.*, 2004, este método tem influência na textura dos alimentos, nomeadamente no aumento do amolecimento/diminuição dureza das células vegetais.

5.3.3. Açúcares totais

Os resultados do açúcar total em solução expressos na concentração em glicose estão evidenciados na Figura 26.

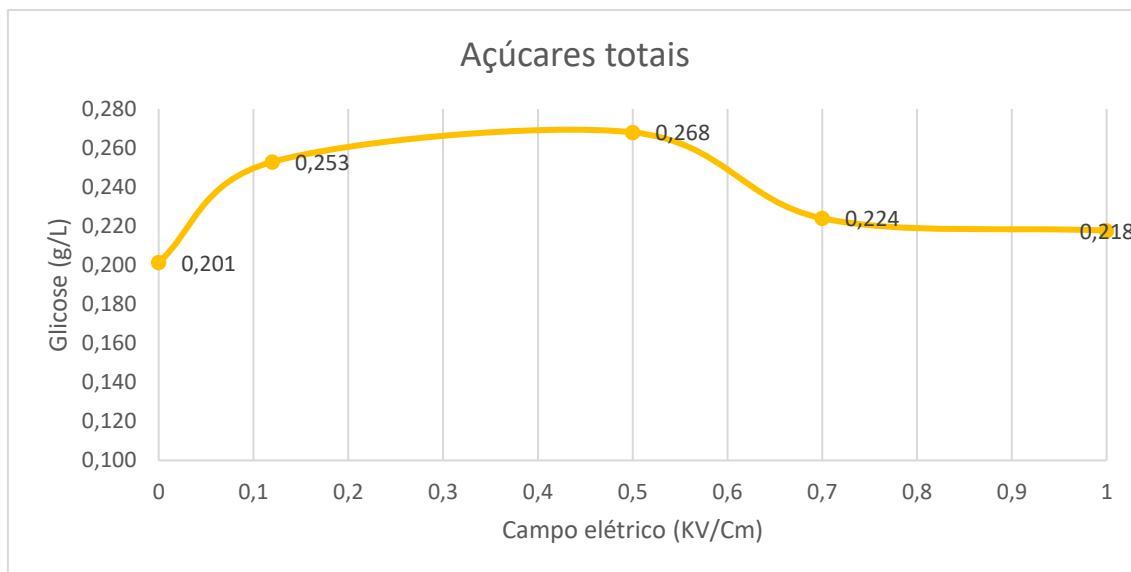


Figura 27 - Concentração de açúcares totais em função do campo elétrico aplicado em batata.

Através da análise da figura 27 o tratamento sem PEF corresponde a uma concentração de 0,201g/l (glicose por litro), no campo elétrico mínimo de 0,253g/l e no campo elétrico máximo de estudo de 0,218 g/l.

Através da figura 27, conclui-se que a concentração de glicose libertada não varia, significa que o campo elétrico não altera significativamente a composição da glicose na batata em relação à amostra sem tratamento PEF.

Sendo assim, tal como na beterraba, na batata não existem grandes alterações da composição em glicose em solução. Uma vez que ambas são tubérculos e possuem uma grande quantidade de amido.

6. Conclusão

Este trabalho teve como objetivo principal contribuir para o estudo da aplicação PEF no tratamento de produtos alimentares, mais especificamente em batata e beterraba.

Neste estudo realizaram-se testes numa câmara de tratamento *batch* com uma distância entre elétrodos de 10 cm e uma variação da intensidade do campo elétrico entre 0,12 e 1 KV/cm no gerador de campos elétricos pulsados EPULSUS®, modelo LPM1A-10.

Para avaliação do efeito dos campos elétricos pulsados na batata e beterraba foram realizados testes de análise de textura, análise de açúcares totais e a diferença total de cor por colorimetria em beterraba e em solução.

O teste de análise da textura utilizando a sonda cilíndrica P/2 em batata e beterraba após tratamento PEF, permite avaliar a resistência da amostra a uma determinada força/deformação. Os resultados deste teste não revelaram diferenças significativas pelo efeito do campo elétrico. Como nos outros testes porque não existiu um grande efeito entre relação força exercida e campo elétrico, assim sendo no teste de penetração não foi possível verificar diferenças significativas.

O segundo teste de análise da textura, teste de compressão com recurso a uma sonda Cylinder Probe P/75, consiste na avaliação da firmeza e simultaneamente da quantidade de exsudado libertado com recurso a uma amostra de papel de filtro. Segundo os resultados obtidos, na amostra de beterraba não se verifica uma diferença significativa entre a aplicação do campo elétrico 0,5KV/cm e o 0,7KV/cm, e tal como esperado verifica-se um ligeiro aumento da perda de peso com o aumento do campo elétrico. Existem diferenças, ou seja, quanto maior o campo elétrico maior é a libertação de exsudado. Relativamente aos ensaios realizados nas amostras de batata verifica-se que quanto maior o campo elétrico maior é a perda de peso na batata, apesar de quantitativamente essas diferenças serem mínimas, tal como na beterraba.

O terceiro e último teste de análise de textura, foi um teste de compressão uniaxial com recurso a uma célula de carga de (5kg) e uma sonda *Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell)*. Através deste teste foi possível determinar a influência dos campos elétricos pulsados na resistência à deformação da amostra. Segundo os resultados obtidos às amostras de beterraba, verifica-se que a força máxima expressa em

Newton é de 45,12N e a mínima de 4,27 N. Tal como esperado existe uma diminuição da força máxima (N) com o aumento do campo elétrico (KV/cm). Segundo os resultados obtidos às amostras de batata, verifica-se que a força máxima expressa em Newton varia entre 5,10 e 17,27 N. *Tal como esperado*, existe uma diminuição da força máxima (N) com o aumento do campo elétrico (KV/cm). No que diz respeito à análise da textura da batata após o tratamento com PEF, os resultados dos testes de compressão e penetração são semelhantes aos da beterraba, porém a escala de força nos testes de compressão é completamente diferente, pois as células vegetais também são muito diferentes em cada produto

Os açúcares totais libertados para a solução aumentam consoante o campo elétrico. Nas amostras de beterraba os valores variam entre 0,233g/l e 0,652 g/l. Nas amostras de batata, as amostras variam entre 0,201g/l e 0,218 g/l. conclui-se que a concentração de glicose libertada não varia, ou seja, o campo elétrico não altera significativamente a composição da glicose na batata e beterraba em relação à amostra sem tratamento PEF.

A diferença total de cor na beterraba foi obtida através do cálculo da fórmula $\Delta E^* = [\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}]^{1/2}$, onde as amostras sem tratamento dos campos elétricos pulsados são a amostra controlo. Pode-se concluir que, quanto maior o campo elétrico utilizado maior é a diferença de cor, principalmente no componente da cor luminosidade (parâmetro L^*). Relativamente a este parâmetro(L^*), as amostras apresentam uma cor mais clara nas amostras sem PEF em relação às amostras com tratamento PEF, que se apresentam mais escuras após tratamento por PEF.

Para sugestão de trabalhos futuros seria interessante a realização de um estudo de avaliação de textura de batatas confeccionadas (fritas por exemplo) após aplicação do tratamento PEF, bem como outras condições ótimas de processamento em batata, beterraba e outros alimentos de interesse que permitam avaliar os seus efeitos nas microestruturas das amostras. Seria igualmente interessante a realização de um estudo com ensaios em contínuo. Vários outros parâmetros do equipamento para avaliar a sua influência e determinar as condições ideais.

Por fim, este projeto foi relevante para futuros trabalhos na área alimentar aplicando a tecnologia *Pulsed Electric Fields*.

7. Referências Bibliográficas

- Abduh, S. B. M., S. Y. Leong, D. Agyei, and I. Oey, 2019, Understanding the Properties of Starch in Potatoes (*Solanum tuberosum* var. Agria) after Being Treated with Pulsed Electric Field Processing: *Foods*, v. 8.
- Ade-Omowaye, B. I. O., A. Angersbach, K. A. Taiwo, and D. Knorr, 2001, Use of pulsed electric field pre-treatment to improve dehydration characteristics of plant based foods: *Trends in Food Science & Technology*, v. 12, p. 285-295.
- Altunakar, B., 2007. Food Preservation By Pulsed Electric Fields And Selected Antimicrobials. Ph.D. Washington State University.
- Aranaz, I., Mengibar, M., Harris, R., Panos, I., Miralles, B., Acosta, N., Heras, A. (2012). Functional Characterization of Chitin and Chitosan. *Current Chemical Biology*, 3(2), 203–230.
- Araújo, A.; Barbosa, C.; Alves, M.R.; Romão, A.; Fernandes, P. (2023). Implications of Pulsed Electric Field Pre-Treatment on Goat Milk Pasteurization. *Foods* 12, 3913. <https://doi.org/10.3390/foods12213913>
- Arce, F. A. (2002). El cultivo de la Patata (Mundi-Prensa, Ed.). DOI: [doi.org/9788484760788](https://doi.org/10.1002/9788484760788)
- Arshad, R.N.; Abdul-Malek, Z.; Roobab, U.; Munir, M.A.; Naderipour, A.; Qureshi, M.I.; Bekhit, A.E.-D.; Liu, Z.-W.; Aadil, R.M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. *Trends Food Sci. Technol.* 111, 43–54.
- Arshad, R.N.; Abdul-Malek, Z.; Munir, A.; Buntat, Z.; Ahmad, M.H.; Jusoh, Y.M.; Bekhit, A.E.-D.; Roobab, U.; Manzoor, M.F.; Aadil, R.M. (2020). Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective. *Trends Food Sci. Technol.*, 104, 1–13
- Barba, F. J., O. Parniakov, S. A. Pereira, A. Wiktor, N. Grimi, N. Boussetta, J. A. Saraiva, J. Raso, O. Martin-Belloso, D. Witrowa-Rajchert, N. Lebovka, and E. Vorobiev, 2015, Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry: *Food Research International*, v. 77, p. 773-798.
- Barbosa, C.; Araújo, A.; Fernandes, P.; Romão, A.; Alves, M.R. (2023). The Impact of Goat Milk Pretreatment with Pulsed Electric Fields on Cheese Quality. *Foods* 12, 4193. <https://doi.org/10.3390/foods12234193>

- Binoti, M. L., Ramos, A. M., Teixeira, L. J. Q., Stringheta, P. C., Minim, V. R. de P., & Pirozi, M. R. (2012). Campo elétrico pulsado Pulsed electric field. *Ciência Rural*, 42(5), 934–941.
- Bendicho, S., Barbosa-ca, G. V, & Martí, O. (2002). Milk processing by high intensity pulsed electric. *Food Science & Technology*, 13, 195–204.
- Chen, L. and Opara, U. L. (2013). "Texture measurement approaches in fresh and processed foods — A review." *Food Research International* 51(2): 823-835.
- Cie (2004). CIE technical report. Colorimetry, 3rd Edition, 552, 24. [https://doi.org/ISBN 3 901 906 33 9](https://doi.org/ISBN%203%20901%2090633%209)
- Fincan, M., and P. Dejmek, 2002, In situ visualization of the effect of a pulsed electric field on plant tissue: *Journal of Food Engineering*, v. 55, p. 223-230.
- Fincan, M., F. DeVito, and P. Dejmek, 2004, Pulsed electric field treatment for solid-liquid extraction of red beetroot pigment: *Journal of Food Engineering*, v. 64, p. 381-388.
- Garcia, D., Gómez, N., Raso, J., & Pagán, R. (2005). Bacterial resistance after pulsed electric fields depending on the treatment medium pH. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 6, 388–395.
- Gentès, M.-C., Caron, A. and Champagne, C.P. (2022), Potential applications of pulsed electric field in cheesemaking. *Int J Dairy Technol*, 75: 270-288. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12854>
- Guerrero-Beltrán, J.; Sepulveda, D.R.; Góngora-Nieto, M.M.; Swanson, B.; Barbosa-Cánovas, G.V. Milk thermization by pulsed electric fields (PEF) and electrically induced heat. *J. Food Eng.* 2010, 100, 56–60.
- Huang, K., Jiang, T., Wang, W., Gai, L., & Wang, J. (2014). A Comparison of Pulsed Electric Field Resistance for Three Microorganisms with Different Biological Factors in Grape Juice via Numerical Simulation. *Food and Bioprocess Technology*, 7(7), 1981–1995.
- Janositz, A.-K. Noack, D. Knorr (2011). Pulsed electric fields and their impact on the diffusion characteristics of potato slices. *LWT - Food Science and Technology* 44 (9), p.1939-1945
- Jemai, A. B., & Vorobiev, E. (2006). Pulsed electric field assisted pressing of sugar beet slices: Towards a novel process of cold juice extraction. *Biosystems Engineering*, 93(1), 57–68.
- Lebovka, N. I., Praporscic, I., & Vorobiev, E. (2004). Effect of moderate thermal and pulsed electric field treatments on textural properties of carrots, potatoes and apples. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5(1), 9–16.

- Liu, C., N. Grimi, O. Bals, N. Lebovka, and E. Vorobiev, 2021, Effects of pulsed electric fields and preliminary vacuum drying on freezing assisted processes in potato tissue: Food and Bioproducts Processing, v. 125, p. 126-133.
- Loginova, K. V., N. I. Lebovka, and E. Vorobiev, 2011, Pulsed electric field assisted aqueous extraction of colorants from red beet: Journal of Food Engineering, v. 106, p. 127-133.
- Moreda, E. (2021). Beterraba forrageira. Publiindústria.
- Mohamed, M. E. A., & Eissa, A. H. A. (2012). Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology. Structure and Function of Food Engineering, 32, 137–144.
- Nannan Y., Kang H., Chenang L., Jianping W. (2016) Pulsed electric field technology in the manufacturing processes of wine, beer, and rice wine: A review. Food Control 61, p. 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.022>
- Ninfa, A. J., Ballou, D. P., Benore, M. (1998). Fundamental laboratory approaches for biochemistry and biotechnology. Bethesda: MD: Fitzgerald Science Press.
- Nolte, K. (2009). Table Beets (pp. 0–1). pp. 0–1.
- NP 1419 1987. Norma Portuguesa. Frutos, produtos hortícolas e seus derivados. Determinação dos açúcares totais, dos açúcares redutores e dos açúcares não redutores (sacarose). Técnica de Munson e Walker. Processo de referência. (Edição nº: 2).
- Nowacka, M., Tappi, S., Wiktor, A., Rybak, K., Miszczykowska, A., Czyzewski, J., Drozdal, K., Witrowa-Rajchert, D., & Tylewicz, U. (2019). The Impact of Pulsed Electric Field on the Extraction of Bioactive Compounds from Beetroot. Foods, 8(7), Article 244.
- Nowacka, M., S. Tappi, A. Wiktor, K. Rybak, A. Miszczykowska, J. Czyzewski, K. Drozdal, D. Witrowa-Rajchert, and U. Tylewicz, 2019, The Impact of Pulsed Electric Field on the Extraction of Bioactive Compounds from Beetroot: Foods, v. 8.
- Ostermeier, R., K. Hill, A. Dingis, S. Toepfl, and H. Jaeger, 2021, Influence of pulsed electric field (PEF) and ultrasound treatment on the frying behavior and quality of potato chips: Innovative Food Science & Emerging Technologies, v. 67.
- Petit, B., Ritz, M., & Federighi, M. (2002). Nouveaux traitements physiques de conservation des aliments : revue bibliographique. Revue de Médecine Vétérinaire, 153(10), 653–664.
- Ramos, J. A., Vieites, R. L., Daiuto, É. R., Aparecida, K., & Mendonça, V. Z. De. (2016). Modificação da composição física química de beterrabas submetidas a diferentes tipos de corte e métodos de cocção. Energia Na Agricultura, 31, 97–101.

- Ramos, A. M., Stringheta, P., Teixeira, L., Chaves, J. B., & Gomes, J. C. (2006). Aplicação de campos elétricos pulsados de alta intensidade na conservação de alimentos. *Ceres*, 53(308), 425–438.
- Raso, J., W. Frey, G. Ferrari, G. Pataro, D. Knorr, J. Teissie, and D. Miklavcic, (2016). Recommendation guidelines on the key information to be reported in studies of application of PEF technology in food and biotechnological processes: *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 37, p. 312-321.
- Ricci, A., Parpinello, G.P., Versari, A. (2018). Recent Advances and Applications of Pulsed Electric Fields (PEF) to Improve Polyphenol Extraction and Color Release during Red Winemaking. *Beverages* 4, 18. <https://doi.org/10.3390/beverages4010018>
- Rodrigues, I. (2016). Influência dos processos de cura e conservação nas características da batata (*Solanum tuberosum* L .) cv . Monalisa para cozer. Instituto Superior Agronomia.
- Roodenburg, B., de Haan, S. W. H., van Boxtel, L. B. J., Hatt, V., Wouters, P. C., Coronel, P., & Ferreira, J. A. (2010). Conductive plastic film electrodes for Pulsed Electric Field (PEF) treatment-A proof of principle. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11(2), 274–282.
- Sahin, Serpil ; Sumnu, S. G. (2006). *Physical Properties of Foods*. New York: Springer. ISSN 1572-0330.
- Sampedro F, Rodrigo D, Martínez A, Barbosa-Cánovas GV, Rodrigo M. (2006). Review: Application of Pulsed Electric Fields in Egg and Egg Derivatives. *Food Science and Technology International*. 12(5):397-405. doi:[10.1177/1082013206070430](https://doi.org/10.1177/1082013206070430)
- Sampedro, F.; McAloon, A.; Yee, W.; Fan, X.; Zhang, H.; Geveke, D. (2013). Cost analysis of commercial pasteurization of orange juice by pulsed electric fields. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 17, 72–78.
- Soliva-Fortuny, R., A. Balasa, D. Knorr, and O. Martin-Belloso, 2009, Effects of pulsed electric fields on bioactive compounds in foods: a review: *Trends in Food Science & Technology*, v. 20, p. 544-556.
- Soltanzadeh, M.; Peighambaroust, S.H.; Gullon, P.; Hesari, J.; Gullón, B.; Alirezalu, K.; Lorenzo, J. (2022). Quality aspects and safety of pulsed electric field (PEF) processing on dairy products: A comprehensive review. *Food Rev. Int.*, 38, 96–117
- Szczesniak, A. S. (2002). "Texture is a sensory property." *Food Quality and Preference* 13(4): 215-225.

- Wan, J., Coventry, J., Swiergon, P., Sanguansri, P., & Versteeg, C. (2009). Advances in innovative processing technologies for microbial inactivation and enhancement of food safety - pulsed electric field and low-temperature plasma. *Trends in Food Science and Technology*, 20(9), 414–424.
- Wang, Q., Li, Y., Sun, D. W., & Zhu, Z. (2018). Enhancing Food Processing by Pulsed and High Voltage Electric Fields: Principles and Applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(13), 2285–2298. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1434609>
- Toepfl, S., Mathys, A., Heinz, V., & Knorr, D. (2006). Review: Potential of high hydrostatic pressure and pulsed electric fields for energy efficient and environmentally friendly food processing. *Food Reviews International*, 22(4), 405–423.
- Tomasevic, I., Heinz, V., Djekic, I., & Terjung, N.. (2023). Pulsed electric fields and meat processing: latest updates. *Italian Journal of Animal Science*, 22(1), 857–866. <https://doi.org/10.1080/1828051x.2023.2206834>
- Zhang, C., Zhao, W., Yan, W., Wang, M., Tong, Y., Zhang, M., & Yang, R. (2021). Effect of pulsed electric field pretreatment on oil content of potato chips. *Lwt-Food Science and Technology*, 135, Article 110198.
- Zimmermann, U.; Pilwat, G.; Riemann, F. (1974). Dielectric breakdown of cell membranes. *Biophys. J*, 14, 881–899

APÊNDICES

Apêndice I:

Tabela I. Condições de análise de textura para teste de compressão com a sonda cylinder Probe P/75.

Categorias	Valores	Unidades
Test mode:	Compression	mm/sec
Pre-test speed:	5,0	mm/sec
Test speed:	0,10	mm/sec
Post-test speed:	10,0	mm/sec
Target mode:	Force	
Force	100	N
Tigger type	Auto- force	
Tigger force	0,04903	N
Advanced Options	off	

Tabela II. Condições de aplicação do Teste uniaxial de compressão com a sonda Three Point Bend Rigs HDP/3PB.

Categorias	Valores	Unidades
Test mode:	Compression	mm/sec
Pre-test speed:	10	mm/sec
Test speed:	0,1	mm/sec
Post-test speed:	10,0	mm/sec
Target mode:	Distance	
Force	15,0	mm
Tigger type	Auto- force	
Tigger force	0,04903	N
Advanced Options	off	

Tabela III. Condições de avaliação da textura com a sonda cilíndrica P2 no teste de penetração.

Categorias	Valores	Unidades
Test mode:	Compression	mm/sec
Pre-test speed:	5,0	mm/sec
Test speed:	1,0	mm/sec
Post-test speed:	10,0	mm/sec
Target mode:	Distance	
Force	3,0	mm
Tigger type	Auto- force	
Tigger force	0,04903	N
Advanced Options	off	

Apêndice II:

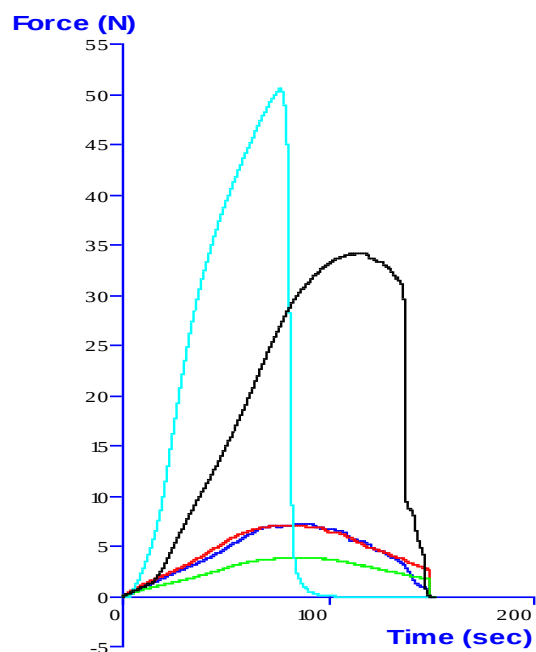


Figura 28. Imagem do texturômetro (software "Exponent") no teste de compressão com a sonda Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell) em beterraba.

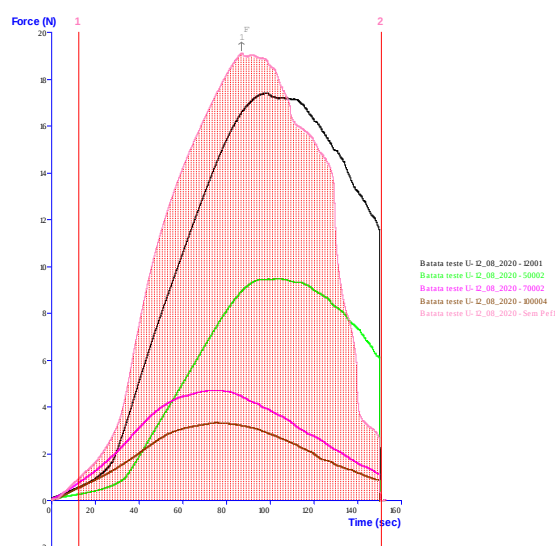


Figura 29. Imagem do texturômetro (software "Exponent") no teste de compressão com a sonda Three Point Bend Rigs HDP/3PB (Forward Extrusion cell) em batata.