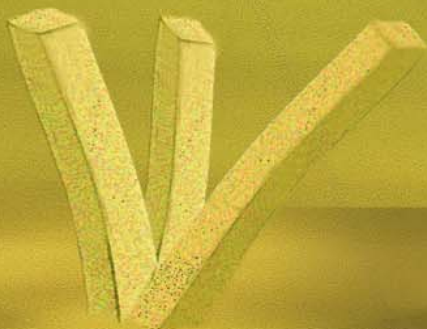
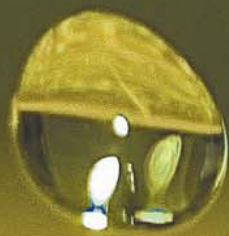


Impact of a pulsed electric field pre-treatment on frying behaviour of potato



Rosanna Mainardi



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Alimentare

Impact of a pulsed electric field pre-treatment on frying behaviour of potato

Thesis in

Principi di Ingegneria Chimica e Impianti Chimici

Relatori:

Prof. Ing. Gaetano Lamberti

Prof. Ing. Anna Angela Barba

Prof. Dietrich Knorr

Candidata:

Rosanna Mainardi

matricola 0620600033

Anno Accademico 2010/2011



Part of this thesis work has been developed during the Erasmus project at the

Technische Universität Berlin, in Germany. It has been performed at the Department of Food Biotechnology and Food Process Engineering, under the supervision of Prof. Dietrich Knorr and Dr. Henry Jaeger and with the collaboration of Dr. Katharina Schössler



Parte di questo lavoro di tesi è stata sviluppata nell'ambito del progetto Erasmus presso

la Technische Universität Berlin, in Germania. In particolare, le attività sperimentali sono state svolte nel Dipartimento di Biotecnologia Alimentare e di Ingegneria dei Processi Alimentari, sotto la supervisione del Prof. Dietrich Knorr e del Dott. Henry Jaeger e con la collaborazione della Dott.ssa Katharina Schössler

*Ai miei genitori,
a Michela*

Questo testo è stato stampato in proprio, in Times New Roman
La data prevista per la discussione della tesi è il 25 marzo 2011
Fisciano, 2 marzo 2011

Contents

Contents.....	I
Figures index.....	V
Tables index	IX
Riassunto	XI
Introduction	1
1.1 Food deep-fat frying: a general overview _____	2
1.2 French fries production process _____	3
1.2.1 Storage	4
1.2.2 Washing, peeling, sorting and cutting	5
1.2.3 Blanching	5
1.2.4 Dipping and pre-drying	5
1.2.5 Frying	6
1.2.6 Cooling and freezing	6
1.3 Quality aspects of French fries _____	7
1.3.1 Appearance	7
1.3.2 Colour and flavor	7
1.3.3 Texture	8
1.3.4 Oil quality and fat uptake	9

Deep-fat frying and pulsed electric field food processes..... 11

2.1 Deep fat frying	12
2.1.1 Equipment	14
2.1.2 Transport Phenomena	16
2.1.3 Fat Degradation	24
2.2 Pulsed Electric Field Processing of Foods	26
2.2.1 State of art	26
2.2.2 Mechanism of Action	29
2.2.3 PEF Equipment	30
2.2.4 Processing parameters	35
2.3 Cell Disintegration Index	38

Aims of the work 43

3.1 Objectives of the work	44
----------------------------	----

Materials and methods 45

4.1 Materials	46
4.1.1 Potato	46
4.1.2 Frying oil	47
4.2 Equipment and accessories	48
4.2.1 PEF unit	48
4.2.2 CDI equipment	49
4.2.3 Cutter, blancher and fryer	49
4.3 Experimental design	51
4.3.1 French fries preparation	51
4.3.2 PEF treatment	53
4.4 Analytical techniques: methods	55
4.4.1 Moisture content	57
4.4.2 Fat content	58
4.4.3 Texture analysis	62
4.4.4 Colorimetric measurements	64

Contents and indexes	Pag. III
4.4.5 Determination of cell disintegration index (Z)	65
4.4.6 Mechanistic approach	65
Results and discussion.....	69
5.1 Disintegration of biological tissue by PEF _____	70
5.1.1 Induction of cell permeabilization by PEF application	70
5.1.2 Effects of blanching and PEF-blanching pretreatments on cell permeabilization of potato tissue (3 μ F)	72
5.2 Overall view _____	74
5.2.1 Moisture content	75
5.2.2 Fat content	76
5.3 Texture analysis _____	80
5.3.1 Impact of PEF on plant tissue structure	80
5.3.2 Broken force, Elastic modulus and Work	81
5.4 Color analysis _____	84
5.5 Radial profiles _____	85
5.5.1 Moisture content	85
5.5.2 Fat content	90
Conclusions	93
6.1 Summary and conclusions _____	94
6.2 Outlook for the future _____	95
References	97

Figures index

Figure 1. Scheme showing the effect of heat treatment on potato tissue ^[2]	8
Figure 2. Schematic cross-section of a piece of food during deep fat frying (right). Scanning electron microscope image of a cross-section of the crust of a fried potato (left). ^[5]	12
Figure 3. Schematic diagram of simultaneous heat and mass transfer during frying ^[6]	14
Figure 4. Scheme for a fryer with an external heating system and fat filter unit ^[6] ...	15
Figure 5. Principle of convective heat transfer during deep frying	17
Figure 6. The simultaneous aspect of both heat and mass transfer: heat from the oil to the product and steam and solutes from the product to the oil	18
Figure 7. Temperature profile in the product during frying ^[9]	19
Figure 8. Drying kinetics and temperature kinetics of 5-mm-thick French fries ^[13]	22
Figure 9. Synthesis of simulated temperature and water profiles during frying ^[9]	23
Figure 10. Changes on fats that occur during frying ^[14]	25
Figure 11. Effect of PEF (electric field strength: 0.9 kV/cm, 750 pulses of 100 μ s each) during osmotic dehydration on (a) the water loss and (b) the solids gain ^[32]	28
Figure 12. Schematic depiction of mechanism of membrane permeabilization by electrocompressive forces induced by an external electrical field ^[38]	30
Figure 13. High voltage pulse generator system ^[38]	31
Figure 14. Configurations of treatment chambers for continuous PEF treatment; (a) parallel plate, (b) coaxial and (c) co-linear configuration ^[38]	34
Figure 15. Exponential and square shape pulses	37
Figure 16. Frequency dependent electrical conductivity of potato tissue after HELP treatment (exponential decay pulse, peak field strength in sample E=0.6 kV/cm, pulse duration t=500 μ s, pulsing rate 1 Hz) and mechanical cell ruptured (homogenization with 'Ultraturrax' 8000 min ⁻¹ , 2 min). Conductivity spectra	

were determined with impedance measurement equipment from the EMM company (Berlin) ^[47]	38
Figure 17. Typical frequency-conductivity spectra of plant tissue with intact cells, partial ruptured and totally ruptured cell in the frequency range of the measured current of 1 kHz to 50 MHz ^[47]	39
Figure 18. Scatter diagram of cell disintegration index Z of apple (Royal gala) samples after a PEF treatment at a field strength of 0.3 to 4 kV/cm and a specific energy input of 0.5 to 10 kJ/g. The red line denotes the average of an YZ-projection of data points of the treatments at a field strength between 1 and 4 kV/cm ^[38]	41
Figure 19. Agria potatoes used in the experimental trials ^[50]	46
Figure 20. a) oscilloscope (top), power supply (down) and frequency generator (in between); b) switch (left) and parallel plate treatment chamber (right); c) view of the entire system (TU Berlin)	49
Figure 21. French fries cutter.....	50
Figure 22. Thermostat water bath	50
Figure 23. Hendi deep fryer with drain tap	51
Figure 24. Flow chart of the experimental process	52
Figure 25. Top view of two baskets immersed in deep-fat frying	53
Figure 26. Plan of analytical controls	56
Figure 27. Heraus oven UT6060.....	57
Figure 28. Moisture analyzer Sartorius MA35	57
Figure 29. Comparison between the fat content performed with and without the acid decomposition.	59
Figure 30. Soxhlet extraction apparatus.....	60
Figure 31. Soxhlet equipment consisted of six units	61
Figure 32. Buchi Rotovapor equipped with waterbath	61
Figure 33. Comparison between three different extraction time with Soxhlet apparatus.....	62
Figure 34. Texture analyzer TA.XT2i	63
Figure 35. Typical texture profile obtained for fried potato strips ^[52]	63
Figure 36. Color Standards for Frozen French Fries potatoes (Munsell color)	65
Figure 37. Outer (blue one), middle (red one) and inner (green one) cylinder	66
Figure 38. A and B: whole potato cylinder; C: a 3 mm tick central disk.....	67
Figure 39. Punching of potato cylinder	67

Figure 40. Conductivity spectra in frequency range from 1.4 kilohertz to 50 megahertz of biological tissue with intact cells (untreated sample) and intact plus ruptured cells (the other ones) after PEF treatment	70
Figure 41. Cell disintegration index depending on energy input after PEF application (corresponding pulse energy and number of pulses is given in Table 5 in section 4.3.2).	71
Figure 42. CDI values of untreated sample versus blanching time	73
Figure 43. CDI values of samples treated at two different PEF intensities after blanching at different times	74
Figure 44. Influence of drying time (10, 20, 30 min) on moisture content during potato processing.....	75
Figure 45. Impact of PEF-treatment on potato strips drying	76
Figure 46. Influence of drying time on fat content (these samples were blanched, dried at three different times and fried)	77
Figure 47. Influence of pulse and capacitor numbers on fat content after PEF treatment and frying	78
Figure 48. Influence of PEF treatment on fat uptake.....	79
Figure 49. Texture profile obtained for fried potato strips	81
Figure 50. Influence of frying time and PEF treatment on maximum force.....	82
Figure 51. Influence of frying time and PEF treatment on rigidity	83
Figure 52. Influence of frying time and PEF treatment on work to penetrate French fries.....	84
Figure 53. “Color Standards for Frozen French Fries potatoes” (Munsell color).....	85
Figure 54. Radial profile of moisture content in fresh (unblanched) sample	86
Figure 55. Radial profile of moisture content in blanched samples	86
Figure 56. Radial profile of moisture content in dried samples.....	87
Figure 57. Radial profile of moisture content in samples fried for 3.5 min.....	88
Figure 58. Radial profile of moisture content in samples fried for 5 min.....	89
Figure 59. Radial profile of moisture content in samples fried for 7 min.....	89
Figure 60. Outer, central and inner part of potato cylinder after 3.5 min of frying ..	90
Figure 61. Radial profile of fat uptake in control sample at different frying time....	91
Figure 62. Radial profile of fat uptake in PEF-treated sample at different frying time.....	91

Tables index

Table 1. Scheme of French fries production process.....	4
Table 2. Chemical composition of potato tubers ^[51]	47
Table 3. Physical characteristic of sunflower oil.....	48
Table 4. Range of the used parameters in the PEF treatments.....	54
Table 5. Values of process parameters for each trial	55
Table 6. Standard deviation about two ways to analyze the moisture content on samples from 4 different batches: fresh sample, blanched sample, dried sample and treated-blanched-dried sample	58

Riassunto

La tecnologia dei campi elettrici pulsati (PEF, *pulsed electric field*) rientra tra le tecniche innovative emergenti che consentono di migliorare le caratteristiche organolettiche e sensoriali limitando i danni termici indotti dai trattamenti tradizionali poiché in grado di indurre elettroporazione negli alimenti, ossia modifiche strutturali reversibili e/o irreversibili e rottura delle membrane cellulari. Nella tecnologia alimentare, la formazione irreversibile di pori rende tale tecnologia una valida alternativa ai metodi convenzionali di disintegrazione cellulare per il miglioramento del trasferimento di materia: in questa ottica il PEF può essere visto come pre-trattamento per esempio alla disidratazione. Particolarmente interessante è l'applicazione del PEF su matrici alimentari destinate al processo di frittura, rappresentando alimenti ad elevato rischio per la salute umana a causa dell'elevato contenuto di grassi, specialmente quelli saturi. Lo scopo di questo lavoro è la valutazione degli effetti del pre-trattamento PEF sull'apporto di grassi nelle *French fries* durante il processo di frittura. La comprensione del meccanismo alla base dell'ingresso dell'olio nelle patatine è di cruciale importanza per il controllo della qualità del prodotto, essendo il contenuto di olio uno dei più importanti aspetti qualitativi negli alimenti fritti.

Il tipo di approccio al problema impiegato è di applicare la tecnica PEF al variare del numero di impulsi elettrici con l'idea che la disintegrazione cellulare raggiungibile potrebbe in qualche misura influenzare il trasporto di acqua ed olio durante il processo di frittura dal momento che le membrane cellulari, possibili barriere al trasporto di materia, sono state distrutte. L'attività sperimentale è stata dedicata, pertanto, alla messa a punto di un pre-trattamento PEF da inserire nel processo tradizionale di produzione delle *French fries*. In questo

lavoro sperimentale svolto presso la TU Berlin, campioni di patate (parallelepipedi dalle dimensioni 9x9x40 mm) sono stati sottoposti a un campo elettrico pulsato (3 kV/cm) con un numero variabile di impulsi di tipo esponenziale e poi sono immersi in acqua calda (blanching) prima a 80°C per 1 min e poi a 66°C per 20 min. In seguito, i campioni sono essiccati a 80°C per 30 min e infine fritti in due steps, tra i quali i campioni vengono congelati. I campioni processati sono stati analizzati per determinare l'effetto del trattamento PEF sulle caratteristiche nutrizionali e organolettiche, con particolare riferimento a contenuto di grassi e acqua, colore e texture.

In prima analisi è stato valutato il grado di disintegrazione cellulare, Z , attraverso una misura dell'impedenza su campioni che hanno subito solo il pre-trattamento PEF. Ovviamente i dati confermano che maggiore è il numero di impulsi applicati maggiore è la disintegrazione cellulare. Altre misure effettuate su campioni che hanno subito anche il pre-trattamento di blanching emerge che Z è indipendente sia dal numero di impulsi applicati sia dalla durata del secondo step di blanching. Analizzando il contenuto di acqua dopo i vari steps del processo si nota che i campioni, trattati e non, perdono la stessa quantità di acqua sia dopo l'essiccamento in stufa che durante la frittura, quindi l'elettroporazione non causa nessuna variazione nella velocità di essiccamento. Passando ad analizzare il contenuto di grassi dopo i due steps di frittura, l'andamento non cambia. Soprattutto dopo la prima frittura, non c'è alcuna differenza tra i campioni trattati e il riferimento, anche al variare del numero di impulsi applicati. Risultati incoraggianti arrivano, invece, dalle misure colorimetriche e della texture. Analizzando il colore, infatti, sembra che il pre-trattamento PEF riduca l'attività enzimatica, la quale provocherebbe naturalmente odore, colore ed aroma non desiderati nel prodotto finito, e accelera durante il blanching la fuoriuscita di materiale solubile dalla matrice vegetale. Si tratta principalmente di zuccheri riducenti, responsabili delle reazioni non enzimatiche che altrimenti si avrebbero durante la frittura, con il conseguente imbrunimento del prodotto. Anche dall'analisi della texture emergono buoni risultati: in particolare, dall'analisi della forza necessaria a penetrare la crosta, si osserva che nei campioni pre-trattati con il PEF si ha la formazione di una crosta più dura e, anche se di poco, più spessa del campione di riferimento. Questo risultato, che potrebbe essere un'attesa conseguenza dell'elettroporazione, dimostra chiaramente che i campi elettrici pulsati causano un cambiamento

nelle proprietà dei tessuti vegetali, ad esempio una parziale perdita di turgidità del campione. Anche i valori della rigidità e del lavoro applicato per penetrare le *French fries* sono maggiori nei campioni pre-trattati rispetto a quelli di riferimento.

Nella seconda parte di questo lavoro di tesi, ulteriori esperimenti sono stati effettuati per meglio comprendere il meccanismo di trasporto dell'acqua e dell'olio rispettivamente verso l'esterno e l'interno del campione (cilindro con diametro di 2.2 cm). L'intero processo è stato pertanto ripetuto, con il pre-trattamento innovativo e non, al fine di ottenere profili di umidità e grassi all'interno del nuovo campione. I profili ottenuti mostrano in maniera chiara che tutti i grassi giacciono nella crosta che viene a formarsi, di circa 1 mm di spessore. Sia la parte più interna che quella intermedia dei cilindri non subiscono grandi variazioni dei due contenuti dopo i vari steps del processo, a prescindere dall'applicazione dei campi elettrici pulsati.

É dunque possibile concludere che il pre-trattamento PEF nel processo di frittura provoca sì una permeabilizzazione delle membrane cellulari nei tessuti della patata ma come risultato non si ottiene un più facile allontanamento di acqua dal campione né durante la fase di essiccamento in stufa né durante la frittura stessa. Di conseguenza, non sono stati ottenuti risultati incoraggianti in termini di umidità e grassi finali nel campione. Ciononostante gli esperimenti hanno dimostrato che, pur non variando il contenuto finale di grassi, il pre-trattamento innovativo può garantire al consumatore *French fries* meno imbrunite dal processo di frittura e più croccanti. Colore e texture, infatti, rappresentano due aspetti qualitativi di primaria importanza per il consumatore: la migliore prospettiva futura è lo sviluppo di un processo innovativo in grado di immettere sul mercato un prodotto più appetibile per la texture e da un punto di vista estetico.

References

1. <http://www.straightdope.+com/>
2. Andersson A., *Modelling of potato blanching*, PhD dissertation, University of Lund, Sweden (1994)
3. Pinthus E.J., Weinberg P. and Saguy I.S., *Criterion for oil uptake during deep-fat frying*, Int. J. Food Science, **58** 204 (1993)
4. Moreira R.G., Palau J.E. and Sun X., *Deep-fat frying of tortilla chips – an engineering approach*, Food Technology, **49** 146-150 (1995)
5. Mellema M., *Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods*, Trends in Food Science & Technology, **14** 364-373 (2003)
6. *Food Processing Handbook*, edited by Brennan J. G., (2006)
7. Weiss T.J., *Frying shortenings and their utilisation in Food Oils and their Uses*, Ellis Horwood Publishers Ltd., Chichester, England, pag.163 (1983)
8. Rassis D. and Saguy I. S., *Kinetics of aseptic concentrated orange juice quality during commercial processing*, Journal Food Science and Technology **30**(2) 191-198 (1995)
9. Vitrac O., Trystramb G., Raoult-Wack A., *Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material*, Eur. J. Lipid Sci. Technol. **102** 529–538 (2000)
10. Farkas B.E., Singh R.P. and McCarthy M.J., *Determination of oil/water distribution within fried foods*, Presented at the Annual Meeting of the Inst. of Food Technologists, New Orleans, LA (1992)
11. Pinthus E. J., Singh R. P., Rubnov M. and Saguy I. S., *Effective water diffusivity in deep-fat fried restructured potato product*, Int. J. Food Science and Technology **32**(3) 235-240 (1977)
12. Ngadi M. O., Watts K.C. and Correia L.R., *Finite element modelling of heat and mass transfer during deep fat frying of chicken drums*, Journal of Food Engineering **32**(1) 11-20 (1997)
13. Gertz C. and Matthäus B., *Optimum deep-frying*, (2008) http://www.dgfett.de/material/optimum_frying.pdf
14. Mackay S., *Techniques and Types of Fat Used in Deep-fat Frying*, (2000)

15. Zhang Q., Qin B. L., Barbosa-Cánovas G. V. and Swanson B. G., *Inactivation of Escherichia coli for food pasteurization by high-strength pulsed electric fields*, Journal of Food Processing and Preservation. **19** 103-118 (1995)
 16. Grahl T. and Märkl H. (1996) *Killing of microorganisms by pulsed electric fields*, Applied Microbiology and Biotechnology **45** 148-157 (1996)
 17. Wouters P. C. and Smelt J.P.P.M., *Inactivation of microorganisms with pulsed electric fields: Potential for food preservation*, Food Biotechnology **11** 193-229 (1997)
 18. Barbosa-Cánovas G.V., Góngora-Nieto M.M., Pothakamury U.R. and Swanson B.G., *Preservation of foods with pulsed electric fields*, San Diego, Academic Press (1999)
 19. Peleg M., *A model of microbial survival after exposure to pulsed electric fields*, Journal of Science of Food and Agriculture **67** 93-99 (1995)
 20. Zhang Q., Barbosa-Cánovas G.V. and Swanson B. G., *Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization*, Journal of Food Engineering **25** 261-281 (1995)
 21. Heinz V., Alvarez I., Angersbach A. and Knorr D., *Preservation of liquid foods by high intensity pulsed electric fields-basic concepts for process design*, Trends in Food Science and Technology **12** 103-111 (2002)
 22. Eshtiaghi M.N. and Knorr D., *Process for treatment of sugar beet*, European Patent, EP 99923708 (1999)
 23. Fincan M. and Dejmek P., *Effect of osmotic pretreatment and pulsed electric field on the viscoelastic properties of potato tissue*, Journal of Food Engineering **59** 169-175 (2003)
 24. Lebovka N.I., Praporscic I. and Vorobiev E., *Combined treatment of apples by pulsed electric fields and by heating at moderate temperature*, Journal of Food Engineering **65** 211-217 (2004)
 25. Hodgins A.M., Mittal G.S. and Griffiths M.W., *Pasteurization of Fresh Orange Juice Using Low-Energy Pulsed Electrical Field*, Journal of Food Science **67(6)** 2294-2299 (2002)
 26. Bendicho S., Estela C., Giner J., Barbosa-Cánovas G.V. and Martin O., *Effects of high intensity pulsed electric field and thermal treatments on a lipase from Pseudomonas fluorescens*, Journal of Dairy Science **85** 19-27 (2002)
 27. Dörnenburg H. and Knorr D., *Monitoring the impact of high pressure processing on the biosynthesis of plant metabolites using plant cell cultures*, Trends in Food Science and Technology **9** 355-361 (1998)
 28. Guderjan M., Toepfl S., Angersbach A. and Knorr D., *Impact of pulsed electric field treatment on the recovery and quality of plant oils*, Journal of Food Engineering **67(3)** 281-287 (2005)
-

29. Barsotti L., Merle P. and Cheftel J.C., *Food processing by electric fields: physical aspects*, Food rev. Intern. **15**(2) 163-180 (1999)
 30. Angersbach A., Heinz V. and Knorr D., *Electrophysiological model of intact and processed plant tissues: cell disintegration criteria*, Biotechnol. Prog. **15** 753-762 (1999)
 31. Rastogi N.K., Eshtiaghi M.N. and Knorr D., *Accelerated mass transfer during osmotic dehydration of high intensity electrical field pulse pretreated carrots*, J. Food sci. **64**(6) 1020-1023 (1999)
 32. Amami, Ezzeddine, Vorobiev, Eugene and Kechaou, *Effect of Pulsed Electric Field on the Osmotic Dehydration and Mass Transfer Kinetics of Apple Tissue*, Drying Technology, **23** 581-595 (2005)
 33. Taiwo A.K., Angersbach A. and Knorr K., *Effects of pulsed electric field on quality factors and mass transfer during osmotic dehydration of apples*, Journal of Food Process Engineering **26** 31-48 (2002)
 34. Sale A.J.H. and Hamilton W.A., *Effects of High Electric Fields on Microorganisms. III. Lysis of Erythrocytes and Protoplasts*, Biochimica Biophysica Acta **163** 37-43 (1968)
 35. Crowley J. M., *Electrical breakdown of bimolecular lipid membranes as an electromechanical instability*, Biophysical Journal. **13** 711-724 (1973)
 36. Zimmermann U., Pilwat G. and Riemann F., *Dielectric breakdown in cell membranes*. Biophysical Journal. **14** 881-899 (1974)
 37. Schoenbach K.H., Peterkin F.E., Alden R.W.I. and Beebe S.J., *The effect of pulsed electric on biological cells: experiments and applications*. IEEE Transactions on Plasma Science. **25**(2) 284-292 (1997)
 38. Toepfl S., *Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food and Bioprocessing - Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis*. Dissertation, Technical University of Berlin. Germany (2006)
 39. Chernomordik L.V., *Electropores in lipid bilayers and cell membranes. Guide to Electroporation and Electrofusion*. D. C. Chang, B. M. Chassy, J. A. Saunders and A. E. Sowers. San Diego, Academic Press (1992)
 40. Glaser R.W., Leikin S. L., Chernomordik L. V. and Pastushenko V. F. A. S., *Reversible electrical breakdown of lipid bilayers: Formation and evolution of pores*. Biochimica Biophysica Acta **940** 275-287 (1998)
 41. Barsotti L., Merle P. and Cheftel J.C., *Food processing by pulsed electric fields: Biological effects*. Food Reviews International, **15** (2) 181-213 (1999)
 42. Ho S. and Mittal G.S., *High voltage pulsed electrical field for liquid food pasteurization*. Food Reviews International, **16** (4) 395-434 (2000)
 43. Pataro G., *The utilization of pulsed electric fields in food stabilization*. University of Salerno Italy (2004)
-

44. Barbosa-Cánovas G.V., Góngora-Nieto M.M., Pothakamury U.R., Swanson B.G., *Preservation of foods with pulsed electric fields*. San Diego: Academic Press (1999)
 45. Jeyamkondan S., Jayas D. S. and Holley R. A., *Pulsed electric field processing of foods: a review*. Journal of Food Protection **62**(9) 1088 – 1096 (1999)
 46. Bushnell A.H., Dunn J.E., Clark R.W. and Pearlman J.S., *High pulsed voltage system for extending the shelf life of pumpable food products*. U.S. patent 5,235,905 (1993)
 47. Angersbach A. and Knorr D., *Impact of high-intensity electric field pulses on plant membrane permeabilization*, Food Science & Technology **9** 185-191 (1998)
 48. Martín O., Zhang Q., Castro A. J., Barbosa-Cánovas G. V. and Swanson B. G., *Pulsed electric fields of high voltage to preserve foods. Microbiological and engineering aspects of the process*. Spanish J. Food Science Technology, **34** 1 – 3 (1994)
 49. Mönch S. and Knorr D., *Influence of high-intensity electric field pulses treatment of plant cells suspension*, Berlin University of Technology (unpublished data), (1997)
 50. <http://www.aardappelpagina.nl/explorer/pagina/catalog/Agria.jpg>
 51. Carillo P., Cacace D., Cappiello M. et al., *Ottimizzazione del processo produttivo e caratterizzazione chimico-fisica di prodotti a base di patata disidratata*
 52. Bungera A., Moyano P. and Rioseco V., *NaCl soaking treatment for improving the quality of french-fried potatoes*. Food Research International **36** 161–166 (2003)
-

Sono arrivata alla pagina più attesa da tutti i laureandi: i ringraziamenti.

Mi sembra doveroso iniziare con un ringraziamento al Professore Gaetano Lamberti e alla Professoressa Anna Angela Barba per avermi seguito in questo lavoro di tesi e per avermi permesso di fare un'esperienza all'estero altamente formativa.

Special thanks to Prof. Knorr, Henry and Katharina. I appreciate all their contributions of time, ideas, and funding to make my experience in Berlin productive and stimulating. The joy and enthusiasm they have for own research was contagious and motivational for me, even during tough times in the pursuit of thesis results.

Un grazie particolare va a mio padre e mia madre, che mi hanno appoggiata e seguita in questi anni di fatica, sudore ma soprattutto gioie... questa laurea è per loro e per nessun altro.

Un grazie va ai miei compagni di avventura:

a Loredana, ci siamo fatte coraggio a vicenda e incitate fino al raggiungimento dell'importante traguardo, sempre insieme;

a Pietro, sicuramente un punto fermo di questi anni sia per quanto riguarda il percorso di studi sia per la bellissima amicizia, un ottimo 'compagno di viaggio'.

Un pensiero particolare va a tutta la mia famiglia:

a mia sorella per tutto quello che mi dà, anche senza volerlo... Seppur più piccola, ho potuto imparare tanto da Te;

ai miei nonni, per tutte le preghiere e gli in bocca al lupo e per esserci sempre;

a tutti gli zii e cugini, per il loro costante interessamento al superamento degli esami.

Un grazie di cuore al mio fidanzato, Luigi, che tra alti e bassi mi è sempre stato accanto, mi ha sopportata in questo periodo di stress e continua a farlo ogni giorno dandomi tutto sé stesso: un punto di riferimento forte nella mia vita e una persona davvero speciale.

Grazie a Umberto, che ha ispirato la copertina di questa tesi... un capolavoro!! Hai sempre creduto in me...

Un grazie speciale ai miei amici, tutti, indistintamente: ognuno di loro mi è stato vicino a suo modo.

Ringrazio, inoltre, tutti i ragazzi di StudentIngegneria.

E, in ultimo, un grazie a me stessa: in fondo se sono arrivata fino a qui, è anche merito mio.

Ognuno di voi mi ha dato qualcosa...

