

Sistemas computacionais para a previsão da qualidade e segurança alimentar: Uma perspectiva de sistemas complexos

Martins, R.C.^{1,*}, Vicente, A.A.², Teixeira, J.A.², Lopes, V.V.^{3,+}

¹ BioInformatics - Molecular and Environmental Research Center

¹ IBB-Institute for Biotechnology and Bioengineering, Universidade do Minho, Campus of Gualtar, 4710-057 Braga-Portugal

² Laseeb, Instituto de Sistemas e Robótica, Instituto Superior Técnico (UTL), Av. Rovisco Pais, P-1049-001 Lisboa, Portugal

*email: ruimartins@bio.uminho.pt

+email: vitor.lopes@ist.utl.pt

Resumo

Os sistemas computacionais para a previsão da qualidade e segurança alimentar assumem hoje maior relevância na prototipagem e simulação da cadeia de distribuição (e.g. gestão do armazenamento, transporte e exposição). Este manuscrito descreve a evolução dos sistemas de previsão até aos actuais sistemas baseados em sistemas complexos (SC), para avaliar o impacto na qualidade e segurança dos alimentos.

Introdução

A qualidade e segurança alimentar têm cada vez maior importância na sociedade moderna. A existência de uma nova consciência e o aumento das actividades fiscalizadoras, contribuem para a contínua diminuição da informalidade na indústria alimentar. Desta forma, iremos assistir a mudanças estruturais significativas no comércio internacional e nacional ao nível de sistemas de suporte de decisão.

A complexidade inerente à perda de qualidade e segurança resulta muitas vezes em medidas de controlo que nem sempre são as mais eficazes. Estas ocorrem na maioria das vezes por falta de monitorização adequada e de ferramentas para a análise dos dados de monitorização, sendo algumas medidas tomadas apenas fundamento 'emocional' para recuperar a confiança dos consumidores em teatros de gestão de crise. Muito embora este assunto seja bastante sensível e de extrema importância económica, o facto é que ainda não existem ferramentas eficientes de monitorização, controlo e gestão da qualidade e segurança alimentar, bem como sistemas que permitam aferir à priori as consequências das decisões legislativas e regulamentares das diferentes instituições que gerem o sistema de distribuição de alimentos.

Embora o rastreio informático em termos logísticos seja hoje uma realidade, esta capacidade de pouco serve em termos de segurança e qualidade alimentar, se não fornecer informação relativa à qualidade físico-química, bioquímica, microbiológica e sensorial dos alimentos, sem a qual não é possível desenvolver ferramentas de suporte à decisão. Este manuscrito tenta fornecer uma visão global dos sistemas de previsão existentes, apresentando resumidamente a evolução da simulação da segurança e qualidade alimentar até à tecnologia de sistemas complexos.

Sistemas de previsão da qualidade alimentar: a sua evolução

A necessidade de prever a perda de qualidade e segurança dos alimentos marca a era da produção em massa. Os primeiros esforços de previsão de segurança alimentar são atribuídos ao processamento térmico por Bigelow [1] (ex: tempos equivalentes de processamento). A simplicidade destes conceitos permitiu o desenvolvimento de métodos de optimização de produção, como por exemplo a utilização dos métodos geral e de Ball [2].

A partir de 1970 a computação aplicada à qualidade alimentar torna-se uma realidade, com a aplicação do método das diferenças finitas (DF) para formas geométricas definidas (e.g. cubos, cilindros, esferas e ovais), aplicados a fenómenos de transferência de calor e massa [3,4].

Por volta de 1980 o uso de computação durante o processamento alimentar é mais generalizado [5,6]. As aplicações desenvolvidas nesta época são dedicadas à simulação do processamento térmico (e.g. esterilização, pasteurização, enchimento a quente), refrigeração/congelamento, secagem e irradiação; com o principal objectivo de optimizar a retenção nutricional e sensorial. Estes primeiros sistemas apresentam dificuldades em simular a morfologia complexa dos alimentos [7,8], como é possível verificar comparando as diferentes

malhas na Figura 1, onde a malha de DF (Figura 1(a)) não é capaz de reproduzir a morfologia dos alimentos, tão perfeitamente como as malhas não estruturadas (Figuras 1(b) e 1(c), respectivamente).

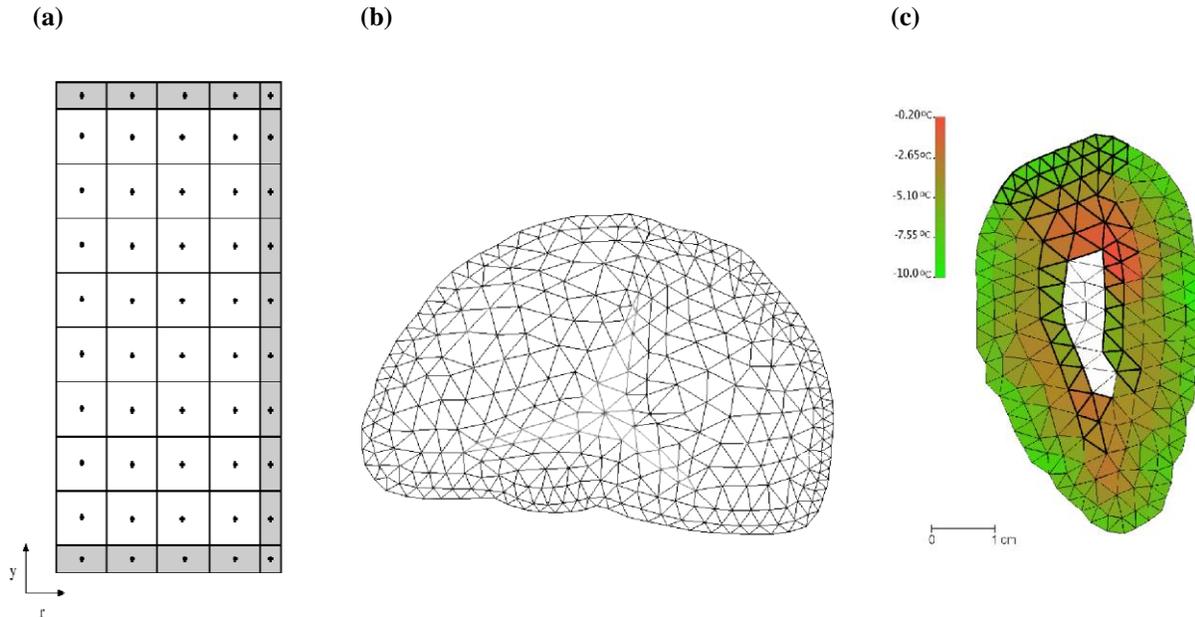


Figura 1 - Modelos para simulação de alimentos: (a) malha para simulação de processamento térmico em produtos enlatados (nodos sem capacitância na superfície); (b) malha para simulação da perda de qualidade e segurança em pescado refrigerado (pele, tecido muscular e esqueleto); (c) morango durante congelação lenta em frigorífico doméstico (polpa e tecido vascular e bolsa de ar interno).

A meio da década de 1990, ferramentas computacionais de volumes finitos (VF) e elementos finitos (EF) ganham importância na simulação de processos alimentares com a utilização de software comercial (muito embora haja trabalhos pioneiros como os de [9,10]) [11-13]. Esta década foi igualmente fértil na utilização de DF na simulação do tratamento térmico, secagem, refrigeração e congelação [14-21], sendo este método ainda hoje utilizado como ferramenta de simulação [22-24]. Ao longo dos últimos anos, estas metodologias têm vindo a ganhar mais importância na prototipagem de processos alimentares [26-39].

Qualidade e segurança alimentar: um sistema complexo

Os alimentos, como todos os sistemas biológicos, podem ser considerados sistemas complexos (SC). SC são sistemas baseados em elementos (blocos elementares de construção de um sistema) que actuam dinamicamente, podendo ter capacidades de adaptação e formar diferentes estruturas mediante o meio envolvente. A partir da interacção dos diferentes elementos emergem diferentes estruturas macroscópicas de elevada diversidade e funções. Desta forma podem-se gerar todo género de sistemas com equilíbrios dinâmicos ao longo do ciclo de vida dos alimentos [40-46].

A cadeia de distribuição (CD) de alimentos é um sistema cujas propriedades emergentes são complexas. Estes sistemas têm sido exclusivamente descritos por modelos estatísticos, como por exemplo, estimar a perda de qualidade e segurança por simulação Monte Carlo utilizando as distribuições do tempo de residência e temperatura em cada ponto da cadeia.

A CD moderna detém sistemas independentes e auto-organizados, onde o fluxo de alimentos ocorre entre os diferentes cenários até chegarem ao consumidor, sendo a qualidade e segurança apenas uma consequência das condições de distribuição ao qual cada embalagem é sujeita durante o seu ciclo de vida (e.g. o modelo de embalagem de feijão verde na Figura 2). Na CD, as diferentes estruturas emergem a partir das interacções entre os múltiplos agentes, podendo formar-se padrões de perda de qualidade difíceis de se interpretar (previsibilidade limitada), sendo um dos factores mais importantes a interacção humana com os alimentos.

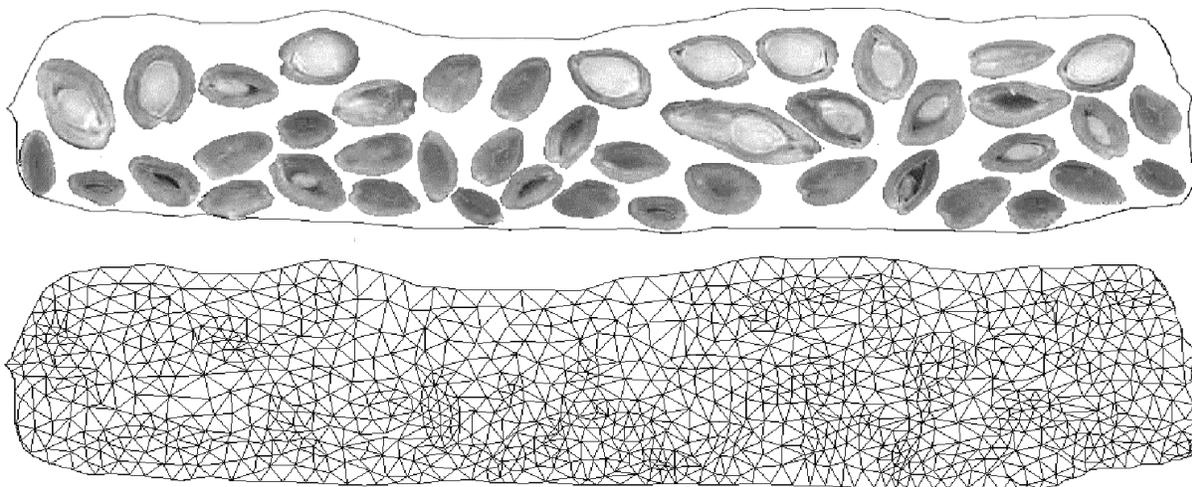
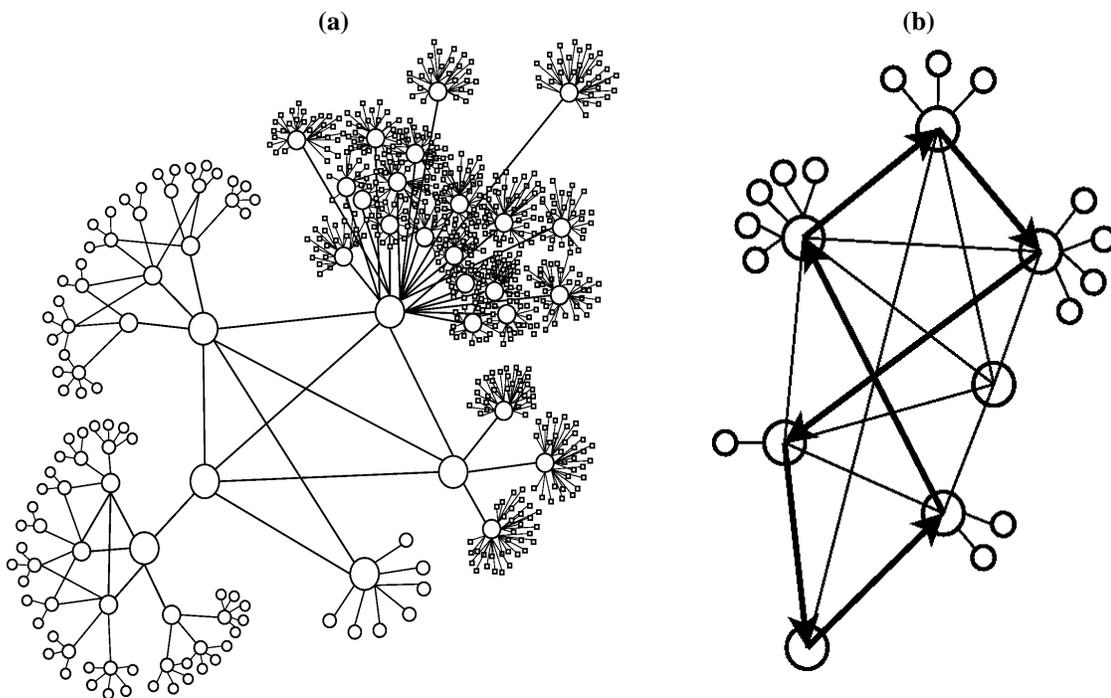


Figura 2 - Corte axial a uma embalagem de feijão verde congelado e sua respectiva malha de elementos finitos: embalagem plástica, ar e seu fluxo interno, bem como as propriedades morfológicas de cada feijão individual (tecido vascular, semente e bolsa de ar).

Na figura 3(a) apresenta-se um exemplo de uma rede de distribuição. Estão representados por círculos os vários estágios, como: i) armazéns de importação; ii) armazéns fabris; iii) plataformas logísticas regionais e pontos de venda (grossistas e retalho). Nesta figura, consideramos que os vértices (círculos) são plataformas logísticas e as margens (linhas), os percursos de produtos entre plataformas, sendo o fluxo unidireccional. Em sistemas complexos consideramos que cada produto é um objecto composto por vários elementos (e.g. Figuras 1 e 2) e que a sua perda de qualidade/segurança ocorre como uma resposta dinâmica do alimento ao cenário (ou condições do percurso) a que está sujeito.



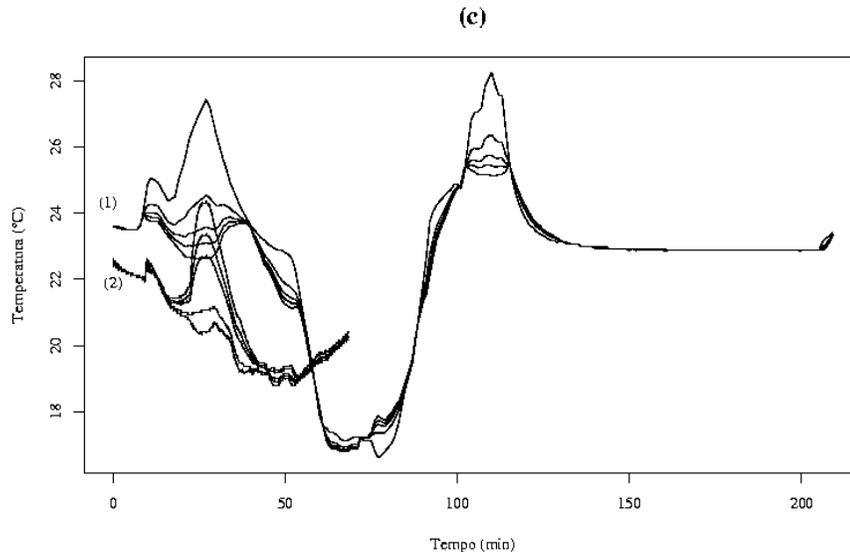


Figura 3 - Perspectiva de sistemas complexos sobre a cadeia de distribuição: (a) exemplo de uma rede de distribuição de produtos alimentares desde a produção até às lojas de retalho; (b) exemplo de percursos possíveis do consumidor dentro de uma superfície comercial de retalho alimentar; e (c) exemplo histórias de temperatura de dois percursos diferentes: (1) compra não planeada e (2) compra planeada.

Durante a distribuição de produtos refrigerados e congelados é comum ocorrerem as seguintes situações fora de controlo: i) plataformas de distribuição: elevadas temperaturas de armazenamento, amplitudes elevadas de flutuação da temperatura de armazenamento, armazenamento de produtos com temperaturas elevadas, longos tempos de armazenamento, carga acima da capacidade de refrigeração instalada e ciclos de descongelação mal planeados; ii) transporte: utilização de carga excessiva, má organização da carga, ajuste para a temperatura mínima de potência de frio; cortes no circuito de refrigeração; tempo excessivo de carga e descarga; exposição da carga ao ambiente e sol; iniciar a carga com o sistema de refrigeração desligado; juntar cargas com diferentes susceptibilidades para perda de qualidade e segurança; corte dos fluxos de ar e correntes de convecção dentro do contentor; iii) loja de retalho: carga acima da capacidade do refrigerador, descongelação do expositor, abuso de temperatura durante a recepção e carga do expositor, temperaturas elevadas e flutuações significativas, carga de alimentos abusados termicamente e a temperaturas elevadas ao expositor.

O comportamento do consumidor, não assume características aleatoriedade. Cada indivíduo toma as suas próprias decisões durante e após a compra dos alimentos. A influência humana apresenta comportamentos característicos que resultam em padrões ordenados de perda de qualidade. Estes deveriam ser tomados em conta durante o projecto da cadeia de distribuição e a sua influência deveria ser incluída no prazo de validade dos alimentos.

O ponto de venda é um dos exemplos de passos críticos de perda da qualidade. Na Figura 3(b) apresenta-se um exemplo da rede de percursos possíveis de um consumidor (margens) dentro de uma loja de retalho com 5 pontos de recolha de alimentos e uma entrada/saída (vértices). Neste exemplo apresenta-se o caso de uma compra planeada, com um percurso ordenado de entrada, recolha planeada e saída da loja. Durante as compras planeadas, os consumidores seguem caminhos pré-definidos dentro da loja; em compras não planeadas, os percursos podem apresentar repetições e arbitrariedade de caminhos, criando percursos mais longos com maior probabilidade de abusos de temperatura (Figura 3(c)).

A complexidade das operações envolvidas em termos de qualidade e segurança alimentar, têm levado a que não exista um procedimento padrão para avaliar as perdas de qualidade, como por exemplo, a avaliação do impacto das histórias de temperatura por forma a tomar decisões operacionais (e.g. aceitação ou não de produtos no ponto de venda mediante diferentes abusos de temperatura). A modelização da CD por SC irá possibilitar a existência de ferramentas de diagnóstico e previsão para a tomada de decisões estratégicas e operacionais.

Caso de estudo: Perda de qualidade durante o armazenamento

O primeiro alimento a ser testado com este sistema foi o feijão verde (*Phaseolus vulgaris*, L.) congelado, sendo possível simular a perda de qualidade sensorial e nutricional deste alimento ao longo da CD [40]. A presente simulação teve por objectivo avaliar o impacto no perfil de qualidade do feijão verde congelado durante o armazenamento em frigoríficos domésticos. Neste cenário considerou-se que os consumidores detêm os mais variados equipamentos de refrigeração, com diferenças de desempenho, configurações e níveis de utilização, levando em conta os vários tipos de: i) frigoríficos e suas configurações operacionais; ii) embalagem; iii) empacotamento e propriedades do leite; e iv) as variações das propriedades físico-químicas; permitindo avaliar o sistema de datação por estrelas, que no caso do feijão verde estabelece os seguintes limites de prazo de validade: i) nenhuma estrela (frigorífico, +5°C): 1 dia; ii) uma estrela (*, -6°C): 4 dias; iii) duas estrelas (**, -12°C): 14 dias; e iv) três estrelas (***, -18°C): 60 dias.

A Figura 4 apresenta a posição de várias embalagens de feijão verde congelado em condições representativas dos cenários de simulação num gráfico de Gabriel. Este foi construído utilizando o perfil de qualidade das amostras de feijão verde que possuem valores de qualidade em todos os parâmetros valores superiores a 60% do conteúdo inicial, sendo as elipses na Figura 4(a) os limites de confiança CP (90% e 95%). Desta forma, todas as embalagens dentro das elipses detêm um perfil de qualidade dentro das especificações sensoriais e nutricionais esperadas.

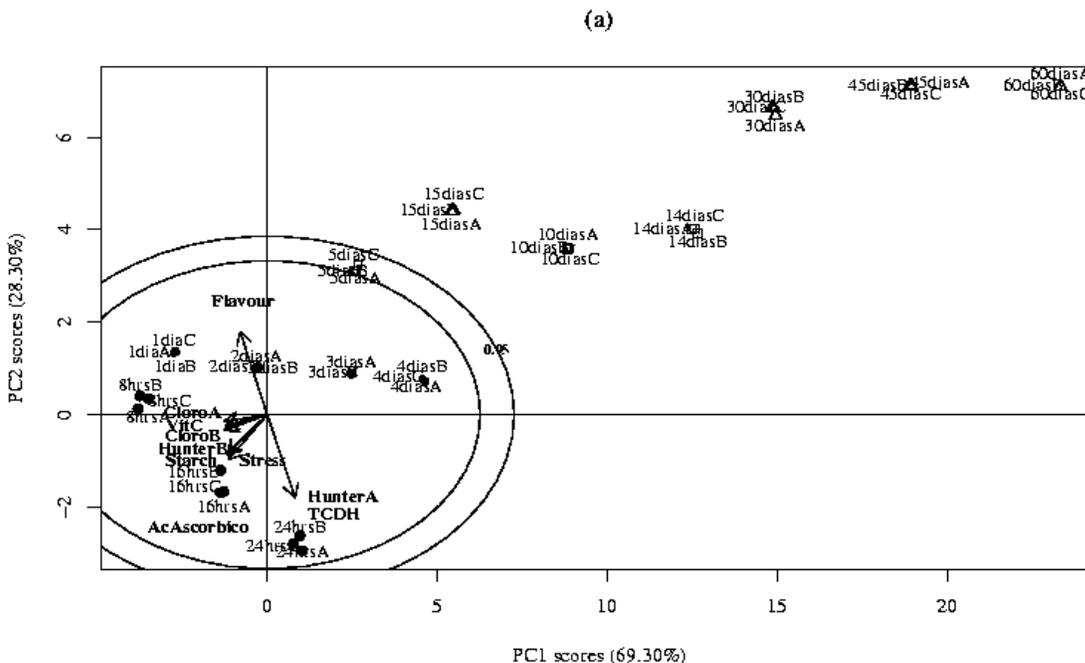


Figura 4 - Padrões de perda de qualidade do feijão congelado durante o armazenamento e distribuição: (a) componentes principais (97.6%) e limites de controlo de qualidade (90% e 95%, respectivamente).

É possível observar que as amostras que estão fora dos limites de controlo correspondem às temperaturas de armazenamento de -12 e -18°C. Estas, muito embora apresentem teores de sabor aceitável para o consumidor, apresentam valores bastante baixos de ácido ascórbico, vitamina C total e clorofilas, o que torna este produto edível, mas de baixo valor nutricional quando comparado com as amostras dentro dos limites de controlo. Desta forma, as simulações demonstram que o uso exclusivo da análise sensorial para a datação produz baixos rácios nutricionais a partir do 45º dia de armazenamento [33,47-49].

As simulações demonstram a existência de padrões de perda de qualidade em diferentes tipos de cadeias de distribuição. Se considerarmos que ao longo da distribuição os alimentos congelados nunca ultrapassam a temperatura de -25°C, os factores limitantes do seu tempo de vida serão os parâmetros nutricionais, enquanto numa distribuição sem controlo, os alimentos são distribuídos com elevadas frequências de abusos de

temperatura acima das temperaturas de refrigeração (+7°C), os parâmetros sensoriais serão os mais afectados (e.g. sabor, odor, cor e crescimento de microorganismos) [47-49].

Sistemas de simulação: Que futuro?

A qualidade e segurança dos alimentos durante o seu ciclo de vida dependem de quatro grandes grupos de factores que podem ser agregados num modelo de simulação global para suporte à decisão e projecto de sistemas de distribuição alimentar. Nos próximos anos vamos assistir a desenvolvimentos significativos nas seguintes áreas: i) Factores climáticos e ambientais; ii) Propriedades físicas, químicas, nutricionais, sensoriais e microbiológicas; iii) Influência humana; iv) Processamento, armazenamento e distribuição.

Com estes desenvolvimentos, e à medida que o poder de computação aumenta, serão disponibilizadas ao utilizador ferramentas holísticas de diagnóstico da qualidade e segurança alimentar, as quais podem fornecer informações bastante detalhadas de previsão a governos e indústrias alimentares. Estas ferramentas irão possibilitar a quantificação dos planos HACCP instalados, bem como o desenho assistido por computador de novos sistemas de segurança alimentar optimizados para diferentes especificações de cada ramo da rede de distribuição de alimentos.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente suportado pelos fundos plurianuais da Univ. do Minho e IST-ISR, programa POS-Conhecimento que inclui fundos do FEDER.

Referências

- [1] Bigelow, W.D. Structural model requirements to describe microbiological inactivation during mild heat treatment. *Journal of Infectious Diseases*, 29:528--536, 1921.
- [2] Merson, R.L., Singh, R.P., Carroad, P.A. An evaluation of ball's formula method of thermal process calculations. *Food Technology*, 1:66--72, 1975.
- [3] Teixeira, A.A., Dixon, J.R., Zahradnik, J.W., Zinsmeister, G.E. Computer optimization of nutrient retention in thermal processing of conduction-heated foods. *Food Technology*, 23(6):137--142, 1969.
- [4] Teixeira, A.A., Stumbo, C.R., Zahradnik, J.W. Experimental evaluation of mathematical and computer models for thermal process evaluation. *Journal of Food Science*, 40(3):653--655, 1975.
- [5] Datta, A.K., Teixeira, A.A. Numerical modeling of natural convection heating in canned liquid foods. *Transactions of the ASAE*, 30(5):1542--1551, 1987.
- [6] Rodriguez, A.C., Teixeira, A.A., Smerage, G.H., Busta, F.F. Kinetic effects of lethal temperatures on population dynamics of bacterial spores. *Transactions of the ASAE*, 31(5):1594--1601, 1988.
- [7] Pham, Q.T. A fast unconditionally stable finite-difference scheme for heat conduction with phase change. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28:2079--2084, 1985.
- [8] Wilson, H.A., Singh R.P. Numerical simulation of individual quick freezing of spherical foods. *International Journal of Refrigeration*, 10:149--155, 1987.
- [9] DeBaerdemaeker, J., Singh, R.P., Segerlind, L.J. Modelling heat transfer in foods using the finite-element method. *Journal of Food Process and Engineering*, 1:37--50, 1977.
- [10] Abdalla, H., Singh, R. P. Simulation of thawing of foods using finite element method. *Journal of Food Process and Engineering*, 7:273--286, 1985.
- [11] Fluent. *Fluent, the right answer in cfd*, 2008. URL: <http://www.fluent.com/>
- [12] Ansys. *Ansys multyphysics™*, 2008. URL: <http://www.ansys.com/>
- [13] CFX. *Computational fluid dynamics software and services*, 2008. URL: <http://www-waterloo.ansys.com/cfx/>
- [14] Shashkov, M. *Conservative Finite-Difference Methods on General Grids*. CRC Press, London, 1996.
- [15] Rodriguez, A.C., Teixeira, A.A., Smerage, G.H., Lindsay, J.A. Population model of bacterial spores for validation of dynamic thermal processes. *Journal of Food Engineering*, 15(1):1--30, 1992.
- [16] Sapru, V., Teixeira, A.A., Smerage, G.H., Lindsay, J.A. Predicting thermophilic spore population dynamics for UHT sterilization processes. *Journal of Food Science*, 57(5):1248--1257, 1992.
- [17] Alonso, A.A., Gallardo Banga, J. M., Martín, R.P. Mathematical modeling and simulation of the thermal processing of anisotropic and non homogeneous conduction heated canned foods: application to canned tuna. *Journal of Food Engineering*, 18(4):369--387, 1993.

- [18] Banga, J.R., Singh, R.P.. Optimization of the air drying of foods. *Journal of Food Engineering*, 23:189--211, 1994.
- [19] Sanchez, I., Alonso, A.A., Banga, J.R. Temperature control in microwave combination ovens. *Journal of Food Engineering*, 46(1):21--29, 2000.
- [20] Vieira, M.C., Teixeira, A.A., Silva, C.L.M. Kinetic parameters estimation for ascorbic acid degradation in fruit nectar using the paired equivalent isothermal exposures (peie) method under non-isothermal continuous heating conditions. *Biotechnology progress*, 17(1):175--181, 2001.
- [21] Ávila, I.M. L.B., Martins, R.C., Ho, P., Hendrickx, M., Silva, C.L.M.. Feasible approaches to optimise in-pack sterilisation process. *Journal of Food Engineering*, 73:149--156, 2006.
- [22] Zorrilla, S.E., Singh, R.P. Heat transfer in double-sided cooking of meat patties considering two-dimensional geometry and radial shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 10:149--155, 2003
- [23] Wang, L., Singh, R.P. Finite element modeling and sensitivity analysis of double-sided contact-heating of initially frozen hamburger patty. *Transactions of the ASAE*, 47(1):147--157, 2004.
- [24] Sarkar, A., Singh, R.P. Modeling flow and heat transfer during freezing of foods in forced airstreams. *Journal of Food Science*, 69(9): 488--496, 2004.
- [25] VTK. The visualisation toolkit., 2008. URL: <http://www.vtk.org/>
- [26] Varma, M.N., Kannan, A. CFD studies on natural convection of canned food in conical and cylindrical containers. *Journal of Food Engineering*, 77:1024--1036, 2006.
- [27] Fernandes, C.S., Dias, R., Nobrega, J.M., Afonso, I.M., Melo, L.F. , Maia, J.M. Simulation of stirred yoghurt processing in plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering*, 69:281--290, 2006.
- [28] Castro, I., Reis, N., Teixeira, J.A., Vicente, A.A. CFD simulation of rtd of a strawberry pulp in a continuous ohmic heater. *Proceedings of the European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Lisbon, 16 May 2004, Amsterdam : Elsevier, 2004. pages 1--14, 2003.
- [29] Xie, J., Qu, X.H., Shi, J.Y., Sun, D.N.. Effects of design on flow and temperature fields of a cold store by cfd simulation. *Journal of Food Engineering*, 77:355--363, 2006.
- [30] Davey, L. M., Pham, Q. T. Predicting the dynamic product heat load and weight loss beef chilling using multi-region finite difference approach. *International Journal of Refrigeration*, 20:470--482, 1997.
- [31] Davey, L. M., Pham, Q. T. A multi-layered two-dimensional finite element model to calculate dynamic product heat load and weight loss during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*, 23(6):444--456, 2000.
- [32] Estrada-Flores, S., Cleland, A.C., Cleland, D.J. Prediction of the dynamic thermal behaviour of walls for refrigerated rooms using lumped and distributed parameter models. *International Journal of Refrigeration*, 24:272--284, 2001.
- [33] Martins, R.C., Lopes, V.V.. Modelling supercooling in frozen strawberries: Experimental analysis, cellular automation and inverse problem methodology. *Journal of Food Engineering*, 80(1):126-141, 2007.
- [34] Pandit, R.B., Prasad, S. Finite element analysis of microwave heating of potatoe-transient temperature profiles. *Journal of Food Engineering*, 60:193--202, 2003.
- [35] Verboven, P., Datta, A.K., Anh, N.T., Scheerlink, N., Nicolai, B.M. Computation of air flow effects on heat and mass transfer in a microwave oven. *Journal of Food Engineering*, 59:181--190, 2003.
- [36] Scheerlink, N., Marquenie, D., Jancsok, P. T., Verboven, P., Moldes, J.R., Banga, C. G., Nicolai, B.M.. A model-based approach to develop periodic thermal treatments for surface decontamination of strawberries. *Postharvest Biology and Technology*, 39:39--52, 2004
- [37] Zou, Q., Opara, L.U., Mckibbin, R. A cfd modelling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: Ii. computational solution, software development and model testing. *Journal of Food Engineering*, 77:1048--1058, 2006.
- [38] Jia, C.C., Sun, D.N., Cao, C.N. Mathematical simulation of temperature fields in a stored grain bin due to internal heat generation. *Journal of Food Engineering*, 43:227--233, 2000.
- [39] Zhang, J., Datta, A.K. Mathematical modelling of bread baking process. *Journal of Food Engineering*, 75:78--89, 2006.
- [40] Martins, R. C. Modelling Temperature Abuses to Frozen Foods and Effects on Quality. PhD thesis, Escola Superior de Biotecnologia, Universidade Católica Portuguesa, Porto, Portugal, 2004.
- [41] Yam, B.Y. A guide to complex systems. URL: <http://www.neci.org/guide>, 2002.
- [42] Bak, P. *How Nature Works: The Science of Self-Organised Criticality*, Copernicus, New York, 1996.
- [43] Yam, B.Y. *Dynamics of Complex Systems*. Addison-Wesley, New York, 1997
- [44] Wolfram, S. *Cellular automata and complexity: collected papers*. Addison-Wesley, Reading,

Massachusetts, 1994.

[45] Hordijk, W. Dynamic, Emergent Computation in Cellular Automata, PhD thesis, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, 2001.

[46] Shalizi, C.R. Causal Architecture, Complexity and Self-Organization in Time Series and Cellular Automata.

PhD thesis, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, 2001.

[47] Martins, R.C., Silva, C.L.M. Frozen green beans (*Phaseolus vulgaris, L.*) quality profile evaluation during home storage. *Journal of Food Engineering*, 64(4):481--488, 2004.

[48] Martins, R.C., Silva, C.L.M. Green beans (*Phaseolus vulgaris, L.*) quality loss upon thawing. *Journal of Food Engineering*, 65(1): 37--48, 2004.

[49] Martins, R.C., Almeida, M.G., Silva, C.L.M. Green beans (*Phaseolus vulgaris, L.*) quality loss during home storage. part I: Effect of storage conditions and package materials on quality retention. *International Journal of Refrigeration*, 27:850--926, 2004.