



# Sistemas computacionais para a previsão da qualidade e segurança alimentar: evolução e sistemas complexos

Martins, R.C. <sup>\*1</sup>, Lopes, V. V. <sup>2</sup> e Vicente, A. A. <sup>1</sup>

## 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 artigo 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 fiscalizadas 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.

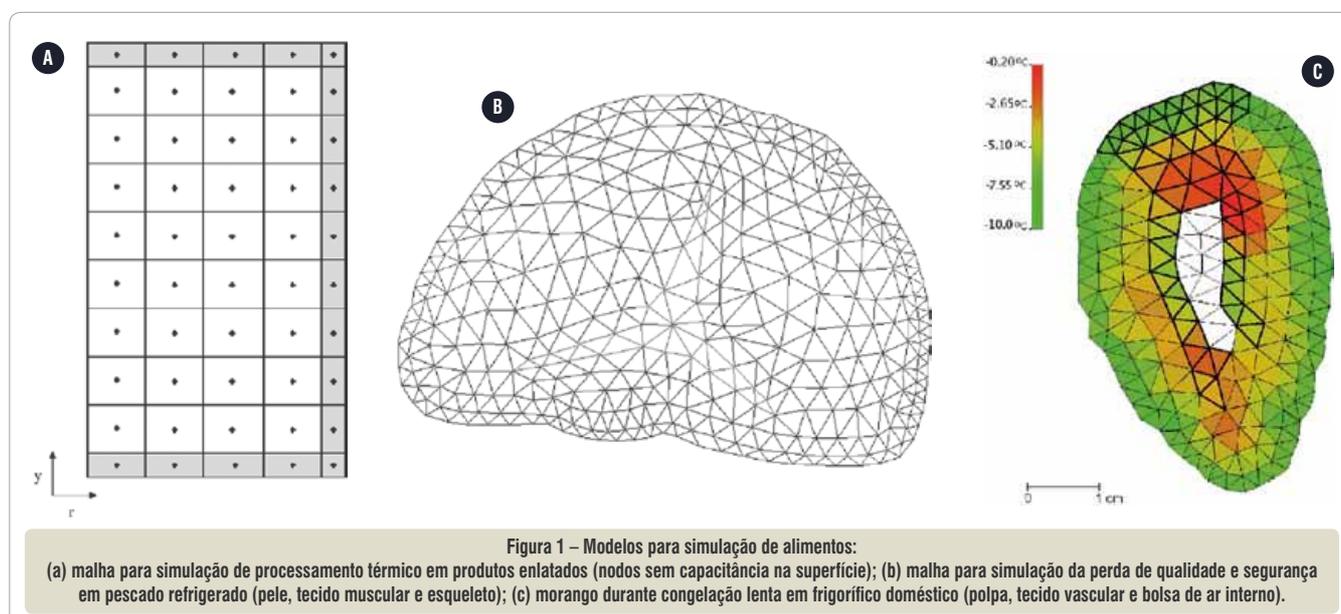
A complexidade inerente à perda de qualidade e segurança resulta muitas vezes em medidas de controlo que nem sempre são as mais eficazes. Estas ocorrem, na maioria das vezes, por falta de monitorização adequada e de ferramentas para a análise dos dados de monitorização, sendo algumas medidas tomadas apenas com fundamento 'emocional' para recuperar a confiança dos consumidores em tempos 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 *a priori* as consequências das decisões legislativas e regulamentares das diferentes insti-

tuições 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 artigo 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 otimização 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 ovas), 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 otimizar 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).

A meio da década de 1990, ferramentas computacionais de volumes finitos (VF) e elementos finitos (EF) ganham importância

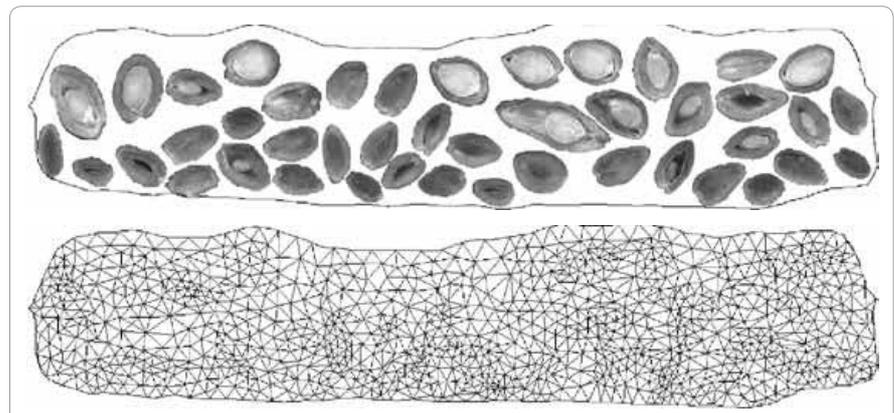


Figura 2 – Corte axial a uma embalagem de feijão verde congelado e sua respectiva malha de elementos finitos: embalagem plástica, ar e seu fluxo interno, bem como as propriedades morfológicas de cada feijão individual (tecido vascular, semente e bolsa de ar).

na 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 congelamento [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 adap-

tação 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

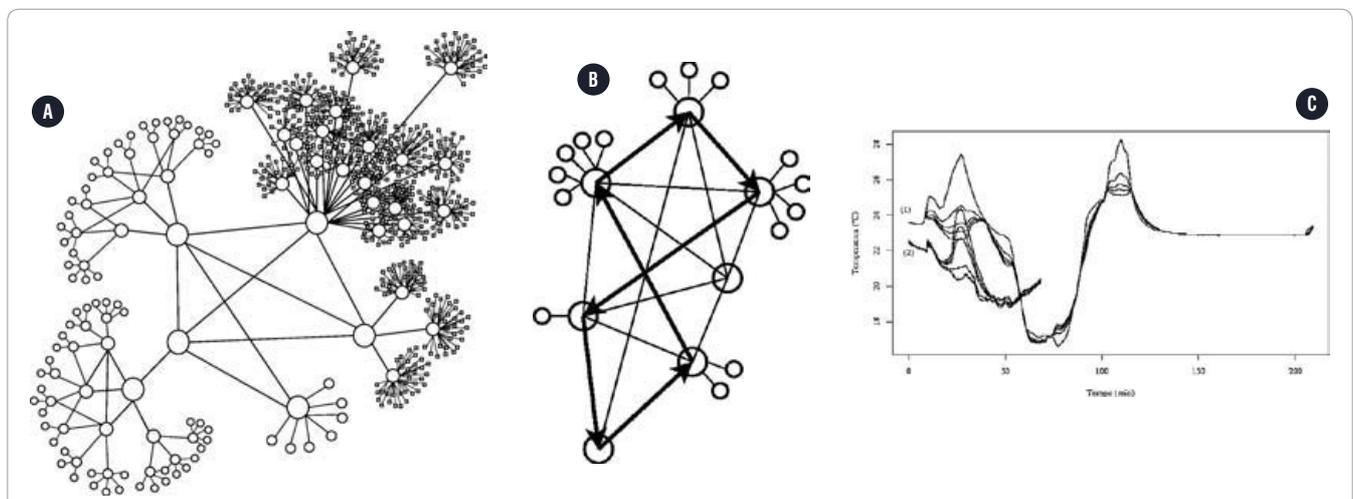


Figura 3 – Perspectiva de sistemas complexos sobre a cadeia de distribuição: (a) exemplo de uma rede de distribuição de produtos alimentares desde a produção até às lojas de retalho; (b) exemplo de percursos possíveis do consumidor dentro de uma superfície comercial de retalho alimentar; e (c) exemplo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

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 interações entre os múltiplos agentes, podendo formar-se padrões de perda de qualidade difíceis de interpretar (previsibilidade limitada), sendo um dos factores mais importantes a interacção humana com os alimentos.

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.

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 de 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

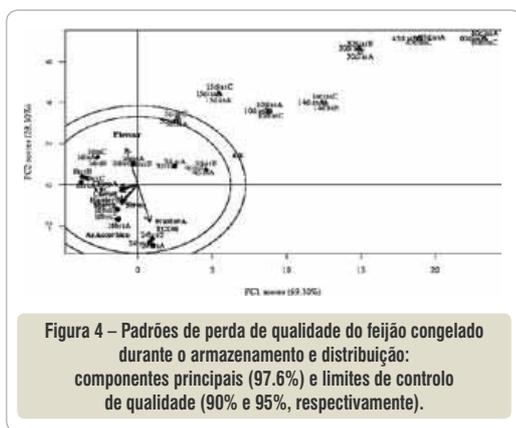
qualidade, como, por exemplo, a avaliação do impacto das histórias de temperatura por forma a tomar decisões operacionais (e.g. aceitação ou não de produtos no ponto de venda mediante diferentes abusos de temperatura). A modelização da CD por SC irá possibilitar a existência de ferramentas de diagnóstico 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 superiores a 60% do conteúdo inicial, sendo as elipses na Figura 4(a) os limites de confiança (90% e 95%, respectivamente). Desta forma, todas as embalagens dentro das elipses detêm um perfil de qualidade dentro das especificações sensoriais e nutricionais esperadas.

É possível observar que as amostras que estão fora dos limites de controlo corres-



alimentos congelados nunca ultrapassam a temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$ , 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 ( $+7^{\circ}\text{C}$ ), os parâmetros sensoriais serão os mais afectados (e.g. sabor, odor, cor) [47-49].

pondem às temperaturas de armazenamento de  $-12$  e  $-18^{\circ}\text{C}$ . 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 45.º 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

### 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

Os autores R.C. Martins e V.V. Lopes agradecem o apoio financeiro das suas bolsas de pós-doutoramento (SFRH/BPD/26133/2005 e SFRH/BPD/20735/2004, respectivamente) à Fundação para a Ciência e Tecnologia.

- 1 IBB – Institute for Biotechnology and Bioengineering, Universidade do Minho Campus de Gualtar, 4710-057 Braga-Portugal
- 2 Laseeb, Instituto de Sistemas e Robótica Instituto Superior Técnico (UTL) Av. Rovisco Pais, P-1049-001 Lisboa, Portugal
- \* E-mail: rui.martins@deb.uminho.pt

### REFERÊNCIAS

- [1] W.D. Bigelow. *J. Inf. Des.*, 29:528-536, 1921.
- [2] R.L. Merson, R.P. Singh, and P.A. Carroad. *Food Tech.*, 1:66-72,75, 1978.
- [3] A.A. Teixeira, J.R. Dixon, J.W. Zahradnik, and G.E. Zinsmeister. *Food Tech.*, 23(6):137-142, 1969.
- [4] A.A. Teixeira, C.R. Stumbo, and J.W. Zahradnik. *J. Food Sc.*, 40(3):653-655, 1975.
- [5] A.K. Datta and A.A. Teixeira. *Trans. ASAE*, 30(5):1542-1551, 1987.
- [6] A.C. Rodriguez, A.A. Teixeira, G.H. Smerage, and F.F. Busta. *Trans. ASAE*, 31(5):1594-1601, 1606, 1988
- [7] Q.T. Pham. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 28:2079-2084, 1985.
- [8] H.A. Wilson and R.P. Singh. *Int. J. of Refrig.*, 10:149-155, 1987.
- [9] J. DeBaerdemaeker, R.P. Singh, and L.J. J. *Food Proc. Eng.*, 1:37-50, 1977.
- [10] H. Abdalla and R. P. Singh. *J. Food Proc. Eng.*, 7:273-286, 1985.
- [11] Fluent. 2006. URL: [www.fluent.com](http://www.fluent.com)
- [12] Ansys. 2006. URL: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
- [13] CFX. 2006. URL: [www-waterloo.ansys.com/cfx/](http://www-waterloo.ansys.com/cfx/)
- [14] M. Shashkov. *Conservative Finite-Difference Methods on General Grids*. CRC Press, London, 1996.
- [15] A.C. Rodriguez, A.A. Teixeira, G.H. Smerage, and J.A. Lindsay. *J. Food Eng.*, 15(1):1-30, 1992.
- [16] V. Sapru, A.A. Teixeira, G.H. Smerage, and Lindsay J.A. *J. Food Sc.*, 57(5):1248-1257, 1992.
- [17] A.A. Alonso J. M. Gallardo Banga, J.R. and R.P. Martín. *J. Food Eng.*, 18(4):369-387, 1993.
- [18] J.R. Banga and R.P. Singh. *J. Food Eng.*, 23:189-211, 1994.
- [19] I. Sanchez, A.A. Alonso, and J.R. Banga. *J. Food Eng.*, 46(1):21-29, 2000.
- [20] M.C. Vieira, A.A. Teixeira, and C.L.M. Silva. *Biotech. Prog.*, 17(1):175-181, 2001.
- [21] I.M. L.B. Ávila, R.C. Martins, P.Ho, M. Hendrickx, and C.L.M. Silva. *J. Food Eng.*, 73:149-156, 2006.
- [22] S.E. Zorrilla and R.P. Singh. *J. Food Eng.*, 10:149-155, 2003
- [23] L. Wang and R.P. Singh. *Trans. ASAE*, 47(1):147-157, 2004.
- [24] A. Sarkar and R.P. Singh. *J. Food Sc.*, 69(9):488-496, 2004.
- [25] VTK. 2006. URL: [www.vtk.org](http://www.vtk.org)
- [26] M.N. Varma and A. Kannan. *J. Food Eng.*, 77:1024-1036, 2006.
- [27] C.S. Fernandes, R. Dias, J.M. Nobrega, I.M. Afonso, L.F. Melo, and J.M. Maia. *J. of Food Eng.*, 69:281-290, 2006.
- [28] I. Castro, N. Reis, J.A. Teixeira, and A.A. Vicente. *Proceedings of the European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Lisbon, 16 May 2004, Amsterdam : Elsevier, 2004. pages 1-14, 2003.
- [29] J. Xie, X.H. Qu, J.Y. Shi, and D.N. Sun. *J. Food Eng.*, 77:355-363, 2006.
- [30] L. M. Davey and Q. T. Pham. *Int. J. of Refrig.*, 20:470-482, 1997.
- [31] L. M. Davey and Q. T. Pham. *Int. J. of Refrig.*, 23(6):444-456, 2000.
- [32] S. Estrada-Flores, A.C. Cleland, and D.J. Cleland. *Int. J. of Refrig.*, 24:272-284, 2001.
- [33] R.C. Martins and V.V. Lopes. *J. Food Eng.*, 80(1):126-141, 2007.
- [34] R.B. Pandit and S. Prasad. *J. Food Eng.*, 60:193-202, 2003.
- [35] P. Verboven, A.K. Datta, N.T. Anh, N. Scheerlink, and B.M. Nicolai. *J. Food Eng.*, 59:181-190, 2003.
- [36] N. Scheerlink, D. Marquenie, P. T. Jancsok, P. Verboven, J.R. Moldes, C. G. and Banga, and B. Nicolai. *Posth. Bio. Tech.*, 39:39-52, 2004
- [37] Q. Zou, L.U. Opara, and R. Mckibbin. *J. Food Eng.*, 77:1048-1058, 2006.
- [38] C.C. Jia, D.N. Sun, and C.N. Cao. *J. Food Eng.*, 43:227-233, 2000.
- [39] J. Zhang and A.K. Datta. *J. Food Eng.*, 75:78-89, 2006.
- [40] R. C. Martins. *Modelling Temperature Abuses to Frozen Foods and Effects on Quality*. PhD thesis, Escola Superior de Biociências, Universidade Católica Portuguesa, Porto, Portugal, 2004.
- [41] B.Y. Yam. URL: [www.neci.org/guide](http://www.neci.org/guide), 2002.
- [42] P. Bak. *How Nature Works: The Science of Self-Organised Criticality*, Copernicus, New York, 1996.
- [43] B.Y. Yam. *Dynamics of Complex Systems*. Addison-Wesley, New York, 1997
- [44] S. Wolfram. *Cellular automata and complexity: collected papers*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1994.
- [45] W. Hordijk. *Dynamic, Emergent Computation in Cellular Automata*. PhD thesis, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, 2001.
- [46] C.R. Shalizi. *Causal Architecture, Complexity and Self-Organization in Time Series and Cellular Automata*. PhD thesis, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, 2001.
- [47] R.C. Martins and C.L.M. Silva. *J. Food Eng.*, 64(4):481-488, 2004.
- [48] R.C. Martins and C.L.M. Silva. *J. Food Eng.*, 65(1):37-48, 2004.
- [49] R.C. Martins, M.G. Almeida, and C.L.M. Silva. *Int. J. Refrig.*, 27:850-926, 2004.