

Aplicação da Fluidodinâmica Computacional (CFD) na Refrigeração de Alimentos: Revisão de Literatura

Betina Louise Angioletti – blangioletti@gmail.com
Tuany Gabriela Hoffmann
João Carlos Decker
Sávio Leandro Bertoli
Carolina Krebs de Souza
Universidade Regional de Blumenau, Departamento de Engenharia Química

R2 - Resfriamento, Congelamento, Estocagem e Exposição de Alimentos

Resumo. *A refrigeração de alimentos é fundamental para garantir a qualidade e a segurança alimentar, e conhecer como os alimentos são afetados por mudanças de temperatura é necessário para determinar e prolongar a shelf life desses produtos. A modelagem e o emprego de CFD são capazes de prever estas características, através da discretização do problema em malhas numéricas, que serão posteriormente solucionadas. Assim, o presente trabalho objetiva estudar o uso de CFD na refrigeração de alimentos, através de uma revisão de literatura, trazendo artigos recentes sobre os fluxos de ar e de calor no refrigerador, e sobre a variação de características físico, químicas e microbiológicas dos alimentos em função das condições de refrigeração. Com o emprego de CFD pode-se encontrar condições ótimas para cada alimento dentro do refrigerador, e prever a variação de suas características ao longo do tempo, assim como aprimorar a performance e até mesmo diminuir os gastos energéticos destes equipamentos.*

Palavras-chave: *Refrigeração de alimentos. Fluidodinâmica computacional. Otimização de refrigeradores. Shelf life.*

1. INTRODUÇÃO

Muitos fatores afetam a qualidade dos produtos alimentícios, mas provavelmente os mais importantes entre eles são a temperatura e sua variação ao longo do tempo. Temperaturas menores são capazes de desacelerar reações químicas e bioquímicas, o crescimento de microrganismos, evaporação da água contida no alimento e outros processos que reduzem a qualidade do alimento e sua *shelf life*, fazendo assim com que a refrigeração de alimentos tenha grande importância econômica (Campanone, Mascheroni, 2002). Os fluxos de ar e calor no refrigerador, assim como os fenômenos que ocorrem durante o armazenamento e refrigeração dos alimentos, pode ser compreendido através de suas respectivas modelagens, tornando assim a modelagem uma ferramenta poderosa e eficaz (Trujillo, 2016).

Os modelos podem ser desenvolvidos tanto para o conhecimento da distribuição térmica do ar no refrigerador, assim como para a predição da variação das características do alimento durante a refrigeração. Temperaturas e velocidades inadequadas do ar podem fazer com que o alimento sofra deterioração prematura. Mesmo que a temperatura global do refrigerador seja adequada, é possível que em alguns pontos, ela seja esteja fora dos limites adequados para cada alimento, favorecendo assim o crescimento de patógenos, em caso de temperaturas elevadas, ou envelhecendo de alguns alimentos, como vegetais, em caso de temperaturas inferiores. Ainda, como as características físicas e químicas do alimento, como perda de peso, atividade de água, perda de calor por resfriamento e quantidade de microrganismos variam com a temperatura, e também são aspectos que determinam a qualidade e a *shelf life* do alimento, a modelagem da variação das propriedades dos alimentos em função de mudanças de temperatura é de suma importância.

O uso de modelos em CFD são uma ferramenta para simulação que faz uso de ferramentas computacionais e matemáticas, que juntas possibilitam a modelagem de escoamento de fluidos para que se conheçam as transferências de massa, calor e quantidade de movimento e para que estes conhecimentos sejam aplicados para a otimização de processos (Xia, Sun, 2002). A primeira parte da modelagem consiste em determinar a geometria do objeto a ser estudado e em criar uma malha numérica, que divide o objeto em um número finito de elementos, que serão posteriormente resolvidos. Em seguida, determina-se as simplificações e configurações do modelo e, por fim, a simulação pode ser realizada. A resposta é gerada através de um conjunto de dados e gráficos. O emprego da CFD em processos alimentícios vem crescendo e possui grande potencial, principalmente por auxiliar no design e otimização de processos, resultando em produtos de maior qualidade e processos mais eficientes.

Assim sendo, o presente trabalho objetiva estudar sobre o emprego de CFD na refrigeração de alimentos, através de uma revisão de literatura elaborada com artigos recentes, proporcionando um panorama geral do potencial desta ferramenta para uso na refrigeração de alimentos. Diversas pesquisas na área são apresentadas, mostrando diferentes propostas e aplicações desta ferramenta, tanto para o fluxo de ar e de calor dentro do refrigerador, como para a modelagem das propriedades dos alimentos.

2. METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma revisão de literatura utilizando artigos publicados em revistas conceituadas entre os anos de 2000 e 2018, a fim de se conhecer diferentes métodos e pesquisas em simulação numérica em CFD para aplicação na área de refrigeração de alimentos.

3. RESULTADOS

Há diversas áreas de aplicação para CFD na refrigeração de alimentos. As modelagens hora são para a predição de características dos alimentos, hora são para verificar o perfil térmico dentro do refrigerador e/ou otimizar as condições do refrigerador e até mesmo seus gastos energéticos. Para melhor avaliar-se as aplicações, estas foram divididas em subcategorias, conforme apresentado nos tópicos seguintes.

3.1 Modelos para transferência de calor e massa para o refrigerador

Os fluxos de ar e calor nos refrigeradores vêm sendo bastante estudados, pois estes afetam tanto o desempenho dos refrigeradores quanto a própria qualidade microbiológica dos alimentos. A formação de zonas de maior temperatura, por exemplo, pode acarretar em um maior crescimento de microrganismos naquele ponto do refrigerador. Estudos propostos variam desde o conhecimento do perfil do fluxo de ar e temperatura, até a otimização destas condições e a obtenção da performance energética do refrigerador.

As simplificações dos modelos apresentados abaixo consistem em fluido incompressível (número de Mach pequeno, aproximadamente 10^{-3}) e a ausência dissipação viscosa (baixos valores do produto entre o número de Prandtl e Eckert, aproximadamente 10^{-4}) (Gupta, Goal e Chakraborty, 2007). Alguns modelos consideram apenas condução e convecção, enquanto outros consideram também radiação. A convecção em refrigeradores sem ventiladores foi considerada natural, e o regime de circulação do ar, laminar, enquanto a convecção em refrigeradores com ventiladores foi considerada forçada, e o regime de circulação do ar, turbulento. Ainda, algumas modelagens foram feitas em estado estacionário e outras em regime transiente.

Um modelo térmico para o ar dentro de refrigeradores *frost-free* foi apresentado por Gupta, Gopal e Chakraborty (2007) e Haque *et al.* (2016). Estes modelos foram desenvolvidos tridimensionalmente e no estado estacionário, e as equações governantes foram discretizadas utilizando o método dos volumes finitos. As temperaturas foram também mensuradas experimentalmente e comparadas com os dados da simulação, e, em alguns pontos, a diferença chegou em 10 °C, provavelmente porque o modelo não computa as perdas de calor para o ambiente externo. As limitações do modelo estão também no uso do estado estacionário – uma vez que os ciclos do refrigerador fazem com que ele não se comporte desta forma – e no fato de que a performance do refrigerador foi medida com ele vazio. Mesmo assim, a proposta destes modelos é para estes sejam utilizados para otimização dos modelos dos refrigeradores, assim como para a estimativa da performance dos já existentes.

A alimentação do refrigerador foi estudada por Laguerre *et al.* (2007b), que analisaram 3 configurações para um refrigerador doméstico de uma porta: refrigerador vazio, refrigerador com 4 prateleiras de vidro e refrigerador cheio com um produto teste de condutividade conhecida. Foram propostos modelos tridimensionais, de fluxo laminar, transiente e considerando ou não radiação, simulados no software Fluent 6.1. Os resultados mostram que as temperaturas média e máxima aumentam com o aumento de obstáculos e que as temperaturas mais baixas se encontram no fundo do refrigerador. Ainda, que maior velocidade do ar é encontrada nas correntes de recirculação, localizada nas paredes, e no fundo do refrigerador. A temperatura foi medida experimentalmente e obteve-se resultados bastante semelhantes, especialmente para o modelo que considerou radiação. O fluxo neste mesmo tipo de refrigerador, porém apenas vazio e com prateleiras, foi analisado experimentalmente por Laguerre *et al.* (2007a) e o modelo também mostrou boa conformidade com a realidade.

Na figura 01 pode-se observar uma proposta de refrigerador doméstico em 3 dimensões, desenvolvido no software DesignModeler, ANSYS® Academic Student, versão 19.2. Este refrigerador consiste de 3 prateleiras, assim como de uma caixa para armazenamento de vegetais na parte inferior e um freezer na parte superior. Já na figura 2 pode-se observar a malha numérica deste equipamento, discretizada utilizando-se elementos tetraédricos. A malha foi desenvolvida no Software Meshing, ANSYS® Academic Student, versão 19.2.

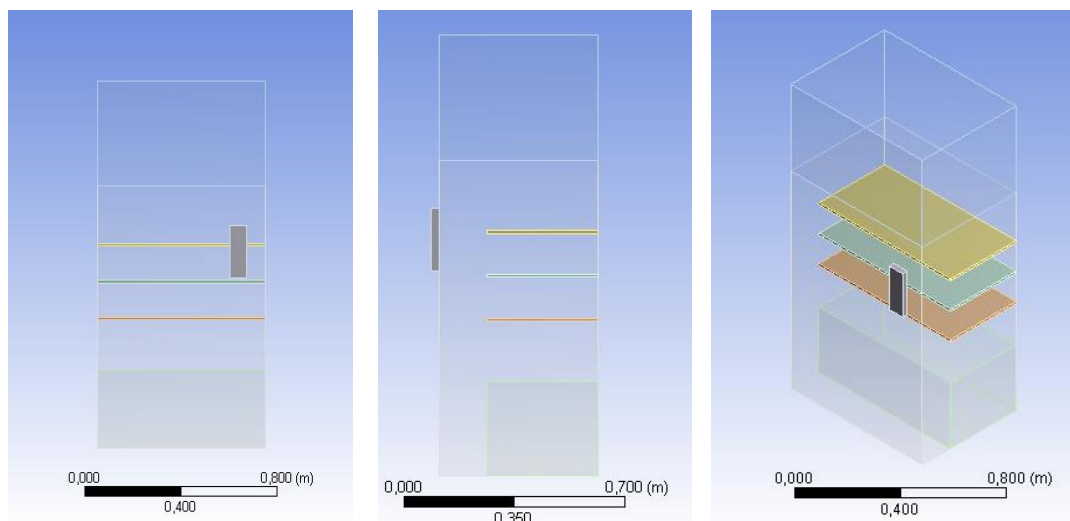


Figura 1. Refrigerador doméstico visto de diferentes ângulos.

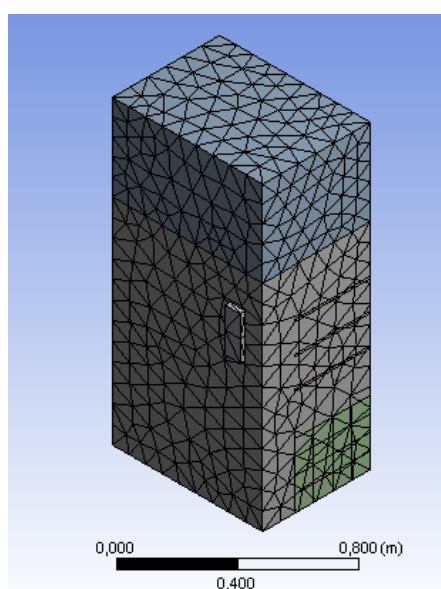


Figura 2. Malha numérica para refrigerador doméstico.

Laguerre e Flick (2010) propuseram um modelo de refrigerador preenchido com produtos lácteos e carne. O modelo, novamente, apresentou bons resultados para a predição de temperatura, e as diferenças se devem principalmente pela dificuldade de se conhecer os coeficientes de troca térmica. Já Zhang e Lian (2014) propuseram um modelo em 2 dimensões para estudar também a influência da radiação em refrigeradores vazios e com alimentos. Os modelos com radiação apresentaram uma maior recirculação de ar entre as prateleiras e duas zonas de recirculação de ar no compartimento de vegetais. Ainda, eles mostram que a radiação aumenta a troca entre o evaporador e as paredes do refrigerador e diminui a convecção natural do ar.

Modelos considerando também a transferência de massa, proporcionando uma visão sobre a evaporação e condensação em refrigeradores, também vêm sendo estudados. Laguerre, Benamara e Flick (2010) e Laguerre *et al.* (2009) carregaram um refrigerador doméstico com diversos cilindros umedecidos e estudaram suas variações de temperatura e umidade, para um modelo em estado estacionário. Os resultados obtidos foram comparados com valores experimentais, que foram próximos, porém subestimados. Ainda, realizou-se a mesma simulação para um refrigerador carregado de produtos. Percebeu-se que há evaporação na maioria dos produtos, exceto próximo ao condensador e na última prateleira, onde percebeu-se a ocorrência de condensação, o que pode ocorrer devido à radiação. Assim, sugere-se o uso de materiais de baixa emissividade, uma vez que a condensação pode favorecer o crescimento de microrganismos nos alimentos.

Nos trabalhos descritos acima, percebe-se que a temperatura não é uniforme ao longo do refrigerador, o que é prejudicial para a conservação de alimentos, podendo favorecer o crescimento de microrganismos em alguns pontos de temperaturas elevadas. Assim, alguns estudos buscam otimizar e uniformizar essa distribuição de temperatura. Ding, Qiao e Lu (2004) estudaram tipos de refrigeradores para analisar a melhor distribuição de temperatura, com o uso do software Star-CD e métodos experimentais. Eles perceberam que o espaço entre as prateleiras e a parede traseira e a porta influenciam significativamente esta distribuição. Um ventilador axial e um duto de ar também foram adicionados na parte superior do refrigerador em um segundo modelo, que apresentou melhor distribuição de temperatura. A posição do ventilador,

entretanto, deve ser analisada cuidadosamente, uma vez que ventiladores em posições equivocadas, como na vertical, podem piorar ainda mais a distribuição.

Fukuyo, Tanaami e Ashida (2003) também propuseram modelos para a uniformidade térmica, além de um modelo para aumentar a taxa de resfriamento do ar dentro do refrigerador. Para isso, eles adicionaram ventoinhas e um jato de ar ao equipamento. Os resultados mostram uma distribuição de temperatura duas vezes mais uniforme, evitando áreas onde o calor ficasse estagnado, e uma taxa de resfriamento 4 vezes maior. Flores, Munoz e Delgado (2014) também conseguiram uma melhor distribuição de temperatura no refrigerador, considerando um modelo de convecção forçada, e uma nova configuração do refrigerador, onde eles inverteram a posição do freezer, colocando-o na parte de baixo do equipamento. Essa configuração resultou ainda em um menor consumo energético, uma vez que o número de ciclos do compressor diminuiu.

Por fim, recentes estudos combinam o uso de CFD com redes neurais artificiais (RNA), obtendo assim uma solução muito mais rápida. Kumlutas *et al.* (2012) utilizaram estes métodos para prever a variação de temperatura e calor perdido no refrigerador. Já Avci *et al.* (2016) aplicaram CFD e RNA para a otimização de um refrigerador, analisando a performance do ventilador utilizado. Assim, conseguiu-se aumentar a eficiência da remoção de calor do refrigerador, e, conseqüentemente, diminuir seu gasto energético.

3.2 Modelos para transferência de calor e massa do alimento durante resfriamento

Alguns alimentos, principalmente carnes, frutas e vegetais são muito sensíveis à temperatura. Mudanças de temperatura afetam tanto o controle microbiológico destes alimentos, como também as propriedades físicas e químicas. Assim, cada vez mais são pesquisadas a influência da refrigeração sob estes alimentos, e o uso do CFD tem sido um forte aliado destas pesquisas.

Davey e Pham (2000) sugeriram um modelo transiente bidimensional com várias seções, utilizando o método de elementos finitos para prever a transferência de calor e massa da carne bovina durante seu resfriamento. Experimentos foram realizados para assegurar a veracidade do modelo, e os resultados obtidos foram satisfatórios, conseguindo-se prever a taxa de calor removida e a perda de peso melhor que que experimentos realizados na área anteriormente. Na figura 03 pode-se observar a estrutura e a malha de um hambúrguer, desenvolvidos nos softwares DesignModeler e Meshing, ANSYS® Academic Student, versão 19.2, respectivamente, para serem posteriormente utilizados para a simulação das propriedades deste alimento. Considerou-se um hambúrguer de 80 mm de diâmetro e 10 mm de espessura.

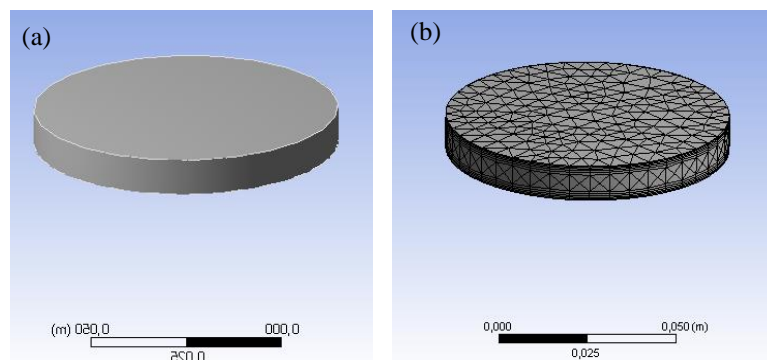


Figura 2. Desenho (a) e malha numérica (b) de um hambúrguer para posterior simulação.

O resfriamento industrial da carne, produzido por uma convecção forçada foi estudado por Trujillo e Pham (2006) e Pham, Trujillo e McPhail (2009), que sugeriram um modelo transiente e geometrias tridimensional e bidimensional dividida em diversas seções, possibilitando a predição da taxa de resfriamento, temperatura, perda de peso e atividade de água. Embora seja aplicada para fins industriais, o processo assemelha-se à refrigeradores com ventoinhas, que geralmente trabalham com convecção forçada também. A simulação foi realizada no software Fluente 6.0. Os resultados de temperatura foram próximos aos obtidos experimentalmente, embora a perda de peso tenha sido superestimada, provavelmente porque a resistência causada pela gordura foi negligenciada.

Santo *et al.* (2010) modelaram o resfriamento e congelamento de produtos de panificação, implementando o método dos elementos finitos para sistemas tridimensionais irregulares. A modelagem do congelamento, que também envolve mudanças de fase, foi feita utilizando o método combinado de entalpia e transformação de Kirchhoff, uma vez que esta combinação é capaz de resolver o problema de mudança de fases, relacionando a entalpia e a integral da condutividade térmica.

A modelagem e simulação permitem também prever o comportamento de microrganismos nos alimentos em função da temperatura e/ou umidade em que estes alimentos são submetidos. Bonis e Ruocco (2016) desenvolveram um modelo capaz de prever a presença de *Escherichia coli* O157:H7, dependendo do regime térmico a que estes alimentos são submetidos e da população inicial de bactérias. Os aspectos considerados para a modelagem foram cinética bacteriana, que depende da temperatura, a migração das bactérias, características da filosfera do alimento e as variações térmicas do meio. O alimento objeto deste estudo foi o repolho e sua geometria considera os espaços entre as folhas, que estão preenchidos e isolados por ar, além de considerar os pontos de contato entre uma folha e outra.

Já Urquiola, Alvarez e Flick (2017) estudaram a formação de gelo durante armazenamento de vegetais congelados expostos a flutuações de temperatura. Os autores desenvolveram um modelo para um meio poroso capaz de prever a velocidade do ar, temperatura do ar e do produto e pontos de formação de gelo. Este modelo consiste em uma embalagem cilíndrica cheia de cubos de cenouras congeladas, com fundo e topo isolados, exposta a uma flutuação de temperatura. Estes experimentos foram validados experimentalmente, embora as temperaturas previstas pelo modelo tenham sido ligeiramente menores. Nota-se também através da modelagem que a taxa de formação de gelo ao longo do tempo é praticamente constante, o ocorre porque esta formação ocorre por fenômenos periódicos como a transferência de calor entre o ar e o produto.

Atualmente há carência de trabalhos em CFD para a refrigeração doméstica, principalmente porque a maioria destes trabalhos são feitos experimentalmente. Entretanto, o uso de CFD para a indústria alimentícia vem crescendo por possibilitar a criação de novas condições e ambientes a serem estudados.

4 CONCLUSÃO

O emprego da modelagem na refrigeração de alimentos auxilia na predição de características fundamentais para que a qualidade e segurança do alimento sejam mantidas, assim como para a otimização dos processos, gerando melhores produtos e processos mais eficientes. São várias e crescentes as aplicações de CFD nesta área, aumentando assim os conhecimentos nos processos estudados. Conhecer os fenômenos de transporte que ocorrem no alimento estudado, entretanto, se faz fundamental para que uma modelagem correta seja empregada e para que simplificações possam ser feitas a fim de se simplificar o modelo.

O emprego de métodos numéricos e de CFD na refrigeração de alimentos e em toda a indústria alimentícia é um elemento chave na melhoria das condições de processamento e do emprego de recursos energéticos, assim como para aumentar a qualidade do produto final. Os trabalhos revisados neste artigo servem como base para a elaboração de novos refrigeradores mais eficientes e mais sensíveis a diferentes tipos de alimentos.

5 AUTORIZAÇÕES / RECONHECIMENTO

Agradecimentos

Agradecemos à Capes e à FAPESC pelo apoio financeiro recebido. Ainda, agradecemos ao Departamento de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Regional de Blumenau. As imagens utilizadas foram cedidas por cortesia da ANSYS, Inc.

6 REFERÊNCIAS

- Avci, H. *et al.* 2016. Optimisation of the design parameters of a domestic refrigerator using CFD and artificial neural networks. *International Journal of Refrigeration*. 67:227-238.
- Bonis, M.V. and Ruocco, G. 2016. A heat and mass transfer perspective of microbial behavior modeling in a structured vegetable food. 190:72-79.
- Campanone, L.A. and Giner S. A. 2002. Generalized model for the simulation of food refrigeration. Development and validation of the predictive numerical method. *International Journal of Refrigeration*. 25:975-984.
- Davey, L.M. and 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.
- Ding, G., Qiao, H. and Lu, Z. 2004. Ways to improve thermal uniformity inside a refrigerator. *Applied Thermal Engineering*. 24(13):1827-1840.
- Flores, J.M., Munoz, A., Delgado, A. 2014. Analysis of the temperature stratification of a no-frost domestic refrigerator with bottom mount configuration. *Applied Thermal Engineering*. 65:299-307.
- Fukuyo, K., Tannami, T. and Ashida, H. Thermal uniformity and rapid cooling inside refrigerators. *International Journal of Refrigeration*. 26(2):249-255.
- Gupta, J.K., Gopal, M.R., Chakraborty, S. 2007. Modeling of a domestic frost-free refrigerator. *International Journal of Refrigeration*. 30(2):311-322.
- Haque, M. E. *et al.* 2016. Predicting airflow and temperature pattern inside a refrigerator through CFD. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 11(14):8621-8628.

- Kumltas, D. *et al.* 2012. Investigation of design parameters of a domestic refrigerator by artificial neural networks and numerical simulations. *International Journal of refrigeration*. 35(6):1678-1698.
- Laguerre, O. and Flick, D. 2010. Temperature prediction in domestic refrigerators: Deterministic and stochastic approaches. *International Journal of Refrigeration*. 33:41-51.
- Laguerre, O., Benamara, S. and Flick, D. 2010. Numerical simulation of simultaneous heat and moisture transfer in a domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*. 33:1425-1433.
- Laguerre, O. *et al.* 2007a. Numerical simulation of air flow and heat transfer in domestic refrigerators *Journal of Food Engineering*. 81:144-156.
- Laguerre, O. *et al.* 2007b. Experimental study of air flow by natural convection in a closed cavity: Application in a domestic refrigerator. *Journal of Food Engineering*. 85(4):547-560.
- Laguerre, O. *et al.* 2009. Experimental and numerical study of heat and moisture transfers by natural convection in a cavity filled with solid obstacles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 52(25):5691-5700.
- Lovatt, S.J. 2014. Modelling in meat Science – Refrigeration. *Encyclopedia of Meat Sciences*. 436-441
- Pham, Q.T., Trujillo, F.J. and McPhail, N. 2009. Finite element model for beef chilling using CFD-generated heat transfer coefficients. *International Journal of Refrigeration*. 32:102-113.
- Santos, M.V. *et al.* 2010. Numerical simulations of chilling and freezing processes applied to bakery products in irregularly 3D geometries. 100:32-42.
- Trujillo, F.J. 2016. Food Process Modeling. *Reference Module in Food Science*.
- Trujillo, F.J. and Phan, Q. T. 2006. A computational fluid dynamic model of the heat and moisture transfer during beef chilling. *International Journal of Refrigeration*. 29(2):998-1009.
- Urquiola, A., Alvarez, G. and Flick, D. 2017. Frost formation modeling during the storage of frozen vegetables exposed to temperature fluctuations. *Journal of Food Engineering*. 214:16-28.
- Xia, B. and Sun, D. 2002. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 34:5-24.
- Zhang, C. and Lian, Y. 2014. Conjugate heat transfer analysis using a simplified household refrigerator model. *International Journal of Refrigeration*. 45:210-222.

Computational Fluid dynamics in food refrigeration: a review

Abstract. Food refrigeration plays an important role in food quality and food safety, and knowing how food is affected by temperatures changes is very necessary to determine and extend products shelf life. The use of computational fluid dynamic (CFD) models leads to a higher knowledge about how refrigeration changes food characteristics, by discretizing the problem using a numerical mesh. For this reason, this article aims to study the use of CFD in food refrigeration, through a literature review of recent articles, that discusses about the air and heat flow in the refrigerator, as well as food physical, chemical and microbiological characteristics because of temperature variations. Using CFD models, effects of various operating and design parameters on the refrigerator performance can be studied, leading to an optimal design and performance estimation of the refrigerator, or even a decrease in energy costs.

Keywords: Food refrigeration. Computational fluid dynamic. Refrigerator optimization. Shelf life.