

Dinámica de fluidos computacional en operaciones de secado y refrigeración aplicados a la industria de alimentos

FOOD ENGINEERING

Computational fluid dynamics in drying and cooling operations applied to the food industry

Juan C. Gómez-Daza^{§*}, Claudia I. Ochoa-Martínez*

*Escuela de Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle, Cali, Colombia

§ juan.gomez.d@correounivalle.edu.co, claudia.ochoa@correounivalle.edu.co

(Recibido: Septiembre 9 de 2010- Aceptado: Octubre 3 de 2011)

Resumen

El estudio de la transferencia de masa se debe iniciar desde el punto de vista de los fenómenos de transporte seguido por los procesos de separación macroscópica. Para desarrollar esta área, se requieren progresos en análisis matemático y en herramientas computacionales para el diseño y optimización de los procesos. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una alternativa versátil y, precisa que ha evolucionado hasta lograr un interés creciente en los últimos años en la comunidad científica de la ingeniería de alimentos. En este artículo se presenta una descripción de los fundamentos de la transferencia de masa y las aplicaciones de CFD en las operaciones de transferencia de masa de la industria de alimentos con base en la literatura disponible en la literatura en las bases de datos Science Direct, EBSCO y Scielo entre los años 1999 y 2009. Se encuentra un crecimiento considerable en el desarrollo y las aplicaciones de CFD en las áreas de secado y refrigeración.

Palabras Clave: CFD, Operaciones, Transferencia de masa, Alimentos, Secado, Refrigeración, Modelos

Abstract

The study of mass transfer should be started from the viewpoint of transport phenomena followed by macroscopic separation processes. To develop the transport phenomena area it is necessary to advance in mathematical analysis and computational tools for processes design and optimization. Computational fluid dynamics (CFD) is a versatile and, accurate choice, which has evolved in recent years to obtain a growing interest in the scientific community of food engineering. This paper shows an overview of the fundamentals of mass transfer and CFD applications in mass transfer operations of food industry, based on the available literature on the Science Direct, EBSCO and Scielo databases between 1999 and 2009. There has been considerable growth in the development and application of CFD in drying and refrigeration areas.

Keywords: CFD, Operations, Mass transfer, Food, Drying, Refrigeration, Models

1. Introducción

En muchas industrias de alimentos se observa un manejo empírico de los procesos. Las causas de esta situación pueden ser: el pobre entendimiento de los fenómenos de transporte debido, por ejemplo, a la dificultad matemática; la difícil aplicación de la teoría clásica de los fenómenos de transporte, aunque sea entendida, a materiales biológicos debido al carácter peculiar de éstos: estructura, propiedades, etc.; al bajo convencimiento que tienen las personas que trabajan en la industria de la importancia de los fenómenos de transporte (Welti-Chanes et al., 2005).

Por otro lado, la transferencia de masa de los constituyentes del alimento (agua, azúcares, sales, aceites, proteínas, ácidos, sabores y sustancias de aroma, oxígeno, dióxido de carbono, monómeros residuales o aditivos poliméricos y toxinas producidas por microorganismos) ocurre durante el procesamiento de éste y afecta su estabilidad y la preservación de su calidad en términos de valor nutricional, textura, color y sabor. Por lo tanto, los fenómenos de transferencia de masa son importantes en el escalamiento y en el control y optimización de procesos (Gekas, 2001; Welti-Chanes et al., 2003). A pesar de la gran variedad de problemas que se pueden presentar en la industria de alimentos que están relacionados con la transferencia de masa, las ecuaciones resultantes para modelar los diferentes casos siempre presentan la misma estructura matemática y sólo cambian las condiciones iniciales y de frontera y los métodos de solución (Crank, 1956; Hines & Maddox, 1987).

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es un conjunto de técnicas numéricas para la solución de ecuaciones de flujo de fluidos que aparecen en la solución de problemas relacionados con procesos dinámicos de transferencia de calor y masa, interacciones sólido-fluido, reacciones químicas, cambio de fase y radiación. Es decir, es el campo de estudio dedicado a solucionar ecuaciones de flujo de fluidos con computadora (Sun, 2006; Cengel & Cimbala, 2006). En este sentido, son varios los trabajos en el área, así, Wang & Sun (2003), realizaron una revisión sobre los desarrollos en modelado numérico de procesos

de calentamiento y enfriamiento en la industria de alimentos. Scott & Richardson (1997) y Xia & Sun (2002), hicieron revisiones sobre la aplicación de CFD en la industria de alimentos. En otros trabajos Sun (2006) y Norton & Sun (2006), se presentan los fundamentos de CFD, los modelos adicionales para procesos en alimentos, los métodos para mejorar la precisión del modelado, las aplicaciones de CFD en la industria de alimentos, los criterios de decisión que enfrentan los modeladores de CFD y, las oportunidades para la industria de alimentos y los beneficios para el consumidor.

En este artículo se presentan algunas aplicaciones de CFD en la industria de alimentos, relacionadas específicamente con las operaciones de transferencia de masa. Además, se discuten los modelos usados para el tratamiento de la transferencia de masa.

2. Modelado con CFD

Para el modelado y simulación de un proceso se consideran tres etapas: la primera es la definición del problema; la segunda es la solución; y la tercera es el análisis de los resultados. En la definición de un problema en CFD, es necesario considerar las ecuaciones de transporte (Scott & Richardson, 1997). Cada problema que se presenta tiene su propio conjunto de ecuaciones que gobiernan el fenómeno con sus respectivas condiciones -iniciales y de frontera-, así como restricciones asociadas a la situación. La ecuación de la conservación de la masa, Ec. (1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

la ecuación de momento, Ec. (2):

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{B} \quad (2)$$

donde $\boldsymbol{\sigma}$ es el tensor esfuerzo Ec. (3):

$$\boldsymbol{\sigma} = -p \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

B g y siendo B la fuerza del cuerpo (Pa), p es la presión (Pa), g la aceleración debida a la gravedad (m/s^2), U el vector velocidad (m/s). Y la ecuación de la energía Ec. (4):

$$\frac{H}{t} = UH + T + \frac{P}{t} \quad (4)$$

donde H es la entalpía total, dada en términos de entalpía (termodinámica) estática, h , $H = h + 1/2U^2$

El mecanismo de transporte de las tres propiedades fundamentales (momento, energía y materia) se puede considerar desde varios puntos de vista: fenomenológico, de la teoría cinética (elemental o rigurosa) y de la termodinámica de los fenómenos irreversibles (Costa-Novella et al., 1984). Así mismo, han surgido métodos de cálculo para las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) a partir de aproximaciones en diferencias finitas y para las ecuaciones características, en el caso de ecuaciones parabólicas, hiperbólicas y elípticas (Perry & Chilton, 1986; Duchateau & Zachmann, 1988).

Hay tres corrientes distintas de técnicas de solución numérica para las EDP: diferencias finitas, elementos finitos y métodos espectrales. Las principales diferencias entre las tres corrientes se asocian con la forma en que las condiciones de flujo se aproximan y con el proceso de discretización. El método de volumen finito se desarrolló como una formulación especial de las diferencias finitas y es el mejor establecido y completamente validado como técnica CFD de propósito general. Éste es el método central en cuatro de los cinco códigos CFD más empleados comercialmente: PHOENICS, FLUENT, FLOW3D y STAR-CD (Versteeg & Malalasekera 1995). Un software que ha venido ganando espacio en aplicaciones de CFD es COMSOL multiphysics®, el cual trabaja con el método de elementos finitos (COMSOL, 2008). Buena parte de la dificultad de implementación de las técnicas de elementos finitos está en incorporar geometrías complicadas, por tal, algunos de los software cobran por aparte los módulos que permiten importar datos geométricos tipo CAD. También,

existen implementaciones de fuente abierta, por ejemplo, openFEM, aunque al parecer no son de uso en la literatura revisada.

3. Transferencia de masa

La transferencia de masa se puede definir como la migración de una sustancia a través de una mezcla bajo la influencia de un gradiente de concentración buscando alcanzar el equilibrio químico (Welti-Chanes et al., 2003). La transferencia de masa está gobernada por la tendencia del componente bajo consideración a pasar de una parte del sistema a otra (Gekas, 2001). En procesamiento de alimentos, los fenómenos de transferencia de masa están presentes en liofilización, deshidratación osmótica, salado y desalado, curado y adobado, extracción, ahumado, horneado, fritura, secado, separación por membranas y en la difusión de vapor de agua, gases o contaminantes a través de películas de empaque (Welti-Chanes et al., 2005; Welti-Chanes et al., 2003).

La transferencia de masa por difusión molecular en estado estable, en la cual no se presentan cambios con el tiempo en la concentración para cualquier posición, se describe mediante la primera ley de Fick (Welti-Chanes et al., 2003) de acuerdo a la Ec. (5):

$$J_i = -D_{im} \frac{C_i}{z} \quad (5)$$

donde J_i es el flux de difusión molecular del componente i ($kmol/s \cdot m^2$) en la dirección z (m), C_i es la concentración del componente i ($kmol/m^3$) y D_{im} es el coeficiente de difusión del componente i con respecto a la mezcla (m^2/s). La difusión en estado transitorio, en la cual la concentración local cambia con el tiempo se describe mediante la segunda ley de Fick. Para una forma plana en una dimensión y suponiendo que el coeficiente de difusión es constante en una mezcla binaria, la difusión (Welti-Chanes et al. 2003) se puede representar por la Ec. (6):

$$\frac{C_A}{t} = D_{AB} \frac{d^2 C_A}{dz^2} \quad (6)$$

donde C_A es la concentración molar del componente A (kmol/m^3) y D_{AB} es el coeficiente de difusión del componente A a través del componente B.

Se pueden escribir ecuaciones análogas para difusión en formas esféricas y cilíndricas y en dos o tres dimensiones. Así, para la difusión en estado estable tridimensional (Bird et al. 2002), la Ec. (5) se representa por la Ec. (7):

$$j_A = -D_{AB} \frac{dw_A}{dx} \quad (7)$$

donde j_A es el flux másico respecto a la velocidad molar y w_A es la fracción másica de la especie A y para la difusión en estado transitorio, la segunda ley de Fick (Crank 1956; Al-Harashsheh 2009), se puede escribir como la Ec. (8):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (8)$$

donde X es el contenido de humedad del material y D_{eff} es el coeficiente de difusión efectivo que implica difusión molecular y difusión Knudsen.

La transferencia de masa por convección o transporte de masa convectivo, el cual ocurre en gases y líquidos, resulta del movimiento del fluido impuesto por fuerzas externas (convección forzada) o de forma natural debido a diferencias de concentración o variaciones de densidad (convección libre). El carácter libre o forzado está determinado por la naturaleza del movimiento del fluido, el cual puede ser laminar o turbulento (Cengel, 2007).

La solución general de las ecuaciones de difusión se puede obtener para una variedad de condiciones iniciales y de frontera asumiendo que el coeficiente de difusión es constante, siendo factible la solución sólo para geometrías sencillas. La solución puede tener una o dos formas estándar. Ambas formas incluyen series de la función error o integrales relacionadas, en las etapas iniciales de la difusión, donde es más apropiada la evaluación numérica a tiempos pequeños; o son de la forma de series trigonométricas que convergen satisfactoriamente

a tiempos mayores. Los principales métodos de solución analítica para las ecuaciones diferenciales parciales de difusión son: combinación de variables, separación de variables, transformada de Laplace, soluciones gráficas, residuos ponderados y análisis de semejanza (Hines & Maddox, 1987).

Cuando el coeficiente de difusión es variable dependiente del tiempo, los métodos de solución requieren una transformación que implica una integral en el tiempo. Si ésta no se puede evaluar formalmente, se debe obtener de manera gráfica o numérica. Crank (1956) presenta diferentes métodos de solución para varios casos que ocurren en problemas de difusión.

Para ilustrar la variedad de problemas que se presentan, algunos estudios realizados en transferencia de masa aplicada a ingeniería de alimentos empleando modelado matemático pero que no aplican CFD para la solución se describen a continuación: Durante el secado de rodajas de alimentos, Yesilata & Aktacir (2009) propusieron que un sistema con difusión multicomponente se puede reducir a un problema de difusión binaria. Triphathy & Kumar (2009) presentaron una metodología para evaluar la dependencia de los coeficientes de transferencia de masa con la temperatura, en el modelado y la optimización de secadores solares. Con base en la idea de que en el secado y en la fritura de alimentos se encuentran características comunes, una de las cuales es la formación de una interfase móvil donde gran parte del calor se absorbe como calor latente de evaporación o sublimación, Farid & Kizilel (2009) modelaron la fritura, el secado con aire, la liofilización, el secado con vapor y el secado por aspersion, incluyeron una región de difusión de humedad rodeada por regiones de núcleo húmedo y una corteza seca. Para simular el secado convectivo de peras, Guiné (2008) usó un modelo matemático que asume una única etapa de secado y se compone de dos ecuaciones diferenciales parciales que permiten encontrar la temperatura T y el contenido de humedad en base seca W . Por otra parte, García-Pérez et al. (2009) desarrollaron un modelo para representar matemáticamente el secado de uva en lecho profundo, con condiciones del aire variables en el tiempo y con la posición.

3.1 Aplicaciones del método CFD en operaciones de transferencia de masa

El secado y la refrigeración son operaciones de transferencia de masa que involucran la interacción fluido-sólido pero que ocurren en diferentes rangos de temperatura. Ambas requieren hacer seguimiento a la distribución de temperatura y a la pérdida de masa. Estas características las convierten en operaciones que se pueden analizar mediante CFD.

Una de las operaciones que más atención ha recibido por parte de los investigadores en CFD es el secado por aspersión. Straatsma et al. (1999) desarrollaron un modelo de secado llamado NIZO-DrySim para simular aspectos del proceso de secado en la industria de alimentos. Lin & Chen (2006) presentaron un modelo para secar gotas de lactosa acuosa usando aproximación de ingeniería de reacciones (REA) para obtener los parámetros. Además, el secado por convección forzada se puede analizar usando una estrategia de solución específica mediante CFD que conduce a una descripción completa del proceso transitorio y multidimensional y permite considerar completamente la transferencia de calor y masa acopladas (De Bonis & Ruocco, 2007). En secado, se ha reportado la simulación de la transferencia simultánea de momento, calor y masa en un secador convectivo con flujo de aire caliente en condición turbulenta sobre la muestra de alimento (Curcio et al., 2008); del secado en lecho profundo considerando la transferencia de calor y masa (García-Pérez et al., 2009); de la transferencia de calor y de masa en productos sometidos a corrientes de aire (Le Page et al., 2009); el modelado de secadores por aspersión (Woo et al., 2008) y combinar la investigación experimental con la numérica en el secado de kiwi (Kaya et al., 2008).

La otra de las operaciones que se han estudiado mediante CFD es la refrigeración (enfriamiento y congelación). En enfriamiento, Foster et al. (2002) midieron y predijeron el movimiento del aire a través de las puertas en cuartos fríos. Drummond & Sun (2008) analizaron la evolución de la temperatura y la pérdida de masa durante enfriamiento al vacío por inmersión. En congelamiento, se ha realizado modelado

numérico del incremento de temperatura en alimentos empacados en paletas en la cadena de distribución (Moureh & Derens, 2000). En refrigeración, Kondjoyan (2006) presenta una revisión de los coeficientes de transferencia de calor y masa durante el almacenamiento y enfriamiento con aire de alimentos y revisa las fortalezas y limitaciones de los modelos CFD. Delele et al. (2008) desarrollaron una metodología de modelado numérico que considera las propiedades geométricas del producto, el diseño de la caja y el apilado aleatorio del producto para predecir el flujo de aire a través de las cajas durante el enfriamiento.

En la Tabla 1 se presentan algunos estudios realizados aplicando CFD en operaciones de secado y de refrigeración de alimentos. Otras aplicaciones que se han modelado mediante CFD son la deshidratación electro-osmótica (Xia et al., 2003), la pasteurización (Jun & Puri, 2005), la fritura (Halder et al., 2007) y la maduración de alimentos fermentados (Mirade, 2008). También, se ha hecho medición y predicción del movimiento del aire en cuartos fríos (Foster et al., 2002), medición dinámica de fluidos (Chef et al., 2004), polarización por concentración (Peng et al., 2004), características de flujo sobre productos empacados sometidos a ventilación (Zou et al., 2006) y transferencia de calor y masa para flujo laminar de aire húmedo en un ducto rectangular (Talukdar et al., 2008).

Considerando las características de los problemas en transferencia de masa, se han reportado modelos de simulación computacional y matemáticos a diferentes niveles de complejidad. Éstos incluyen modelos multidimensionales y multifásicos y se pueden tratar mediante la técnica de elementos finitos (Farinu & Baik, 2008). CFD también se puede comparar con herramientas computacionales como redes neuronales, sin embargo, CFD muestra características de estabilidad numérica para diferente calidad de malla, paso de tiempo y orden de discretización en análisis de flujo de calor y masa (Ben-Nakhi et al., 2008). Además, es posible combinar CFD con el método de los elementos discretos para modelar el flujo de aire a través de productos hortícolas apilados en cajas sometidas a ventilación (Delele et al., 2008). Finalmente, CFD continúa

Tabla 1. Secado y refrigeración en procesamiento de alimentos analizados mediante CFD

Aplicación	Descripción	Software	Referencia
Secado por aspersión de ingredientes	Revisión del área y los patrones de flujo típicos en los secadores	FLOW3D	Langrish & Fletcher (2001)
Secado de pulpa de tomate en secador por aspersión	Estudio de la influencia de las condiciones de proceso	FLUENT 5.3	Goula & Adamopoulos (2004)
Aglomeración en secadores por aspersión	Relación entre configuración, condiciones, composición y propiedades	STAR-CD	Verdurmen et al. (2004); Verdurmen et al. (2006)
Secado de tajadas por chorro directo de aire	Modelamiento de transferencia de calor y masa transitoria y multidimensional	FLUENT 6.1	De Bonis & Ruocco (2007)
Secado por aspersión de carbohidratos	Comparación de dos modelos cinéticos		Woo et al. (2008)
Secado convectivo de kiwi	Investigación experimental y numérica para el flujo externo y el campo de T	FLUENT 6.1.22	Kaya et al. (2008)
Remoción de agua de queso apilado en corriente de aire	Modelo empírico aproximado para estimar transferencia de calor y agua	FLUENT 6.0.20	Le Page et al. (2009)
Secado de camarón en lecho de chorro de aire	Modelo de fenómenos de transporte acoplados y deformación mecánica	COMSOL 3.3a	Niamnuy et al. (2008)
Secado por aspersión de jugo de limón	Introducción de un método numérico experimental para cinética	FLUENT 6.1	Roustapour et al. (2009)
Diseño de enfriadores	Cálculo tridimensional a gran escala.	FLUENT/UNS	Mirade et al. (2002)
Enfriamiento al vacío de carne cocida	Efectos de parámetros sobre la T del núcleo y el perfil de pérdida de peso	CFX	Sun & Hu (2002)
Enfriamiento al vacío de alimentos porosos	Simulación de la transferencia de calor y masa acoplados	CFX	Sun & Hu (2003)
Simulación de cuartos fríos para manzana	Modelo para predecir los campos de flujo y temperatura	Algoritmo SIMPLE	Xie et al. (2006)
Enfriamiento industrial por lotes de carcasa de res	Predicción de la velocidad del aire y la homogeneidad de la ventilación	FLUENT 6.0.20	Mirade & Picgirard (2006)
Refrigeración a granel de alimentos modelo porosos	Enfoque matemático para predecir fenómenos de transporte	ANSYS CFX 5.7.1	Verboven et al. (2006)
Optimización de un cuarto frío para medio poroso	Humidificación con atomizadores de agua, predicción de V_a , T, humedad	FLUENT 6.3.28	Delele et al. (2009)
Enfriamiento de carne	Modelamiento por el método de elementos finitos (FEM) usando coeficientes generados por CFD	FLUENT	Pham et al. (2009)

evolucionando, implementando nuevos conceptos dentro de su estructura, como el de “edad media del aire” (MAA) -concepto parecido al tiempo medio de residencia en un reactor químico- en el modelado de plantas de alimentos con ventilación forzada (Mirade, 2008; Chanteloup & Mirade, 2009).

4. Discusión

Los datos de la Tabla 1 sugieren que el software FLUENT® es el más utilizado en las aplicaciones de análisis de las operaciones de transferencia de masa en la industria de alimentos, así, aparece en 9 de los 17 trabajos referenciados (53 %). De la Tabla 1 también se puede inferir que CFD permite considerar cualquier tipo de alimento y en cualquier tipo de equipo o espacio físico de trabajo, siempre que se pueda implementar geometrías complejas importando datos CAD, siendo los secadores por aspersión y los cuartos fríos los dos sistemas más analizados en las operaciones de secado y refrigeración, respectivamente. Las principales observaciones útiles con CFD en aplicaciones de secado son la predicción de campos de temperatura y velocidad (trayectorias de flujo de las partículas) y los perfiles de temperatura y humedad. Análogamente, en refrigeración se pueden determinar los campos de velocidad, temperatura, flujo y los perfiles de temperatura y peso.

Un análisis general de la literatura revisada permite identificar que son varios los criterios que se han utilizado para determinar la confiabilidad de los resultados de simulación obtenidos mediante CFD, siendo el error relativo, la desviación y la discrepancia media los más representativos. En cuanto al efecto de la variación de algunos de los parámetros propios de la herramienta numérica, se pudo identificar que se han utilizado los tres sistemas coordinados principales -rectangular, cilíndrico y esférico-, la definición del mallado puede estar entre miles a millones de celdas dependiendo de la complejidad del modelo propuesto, donde para la industria de alimentos es posible hacer supuestos como en cualquier sistema que se presente en ingeniería. Se identificó que el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ es el más empleado.

Por otro lado, es posible inferir que las características de las dos operaciones de transferencia de masa, secado y refrigeración, tales como trayectorias de flujo complejas, la velocidad de transferencia como función fuerte de la velocidad y flujo del medio de intercambio y la distribución espacial de las variables principales como temperatura y humedad tanto del medio como del material, definen en cierta medida el interés por el análisis de las mismas mediante CFD

En la Figura 1 se presenta el número de publicaciones entre los años 1999-2009 que se publicaron en las bases de datos Science Direct,

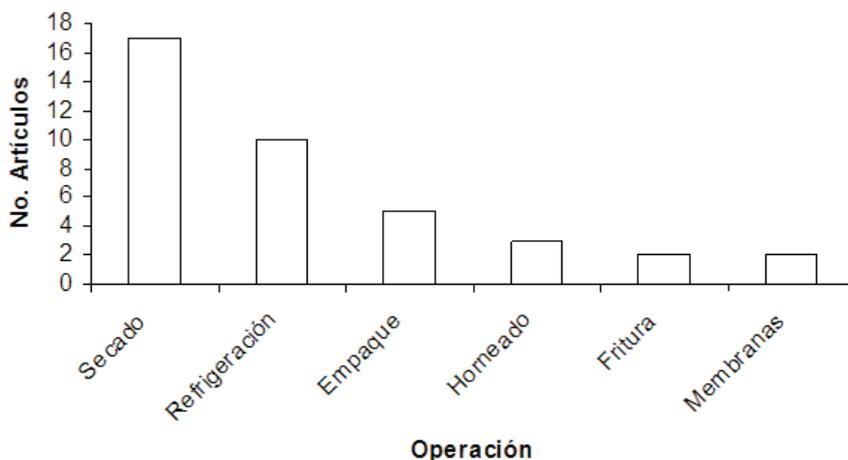


Figura 1 Investigaciones en operaciones de transferencia de masa de la industria de alimentos empleando CFD entre los años 1999-2009 (Bases de datos: Science Direct, EBSCO y Scielo)

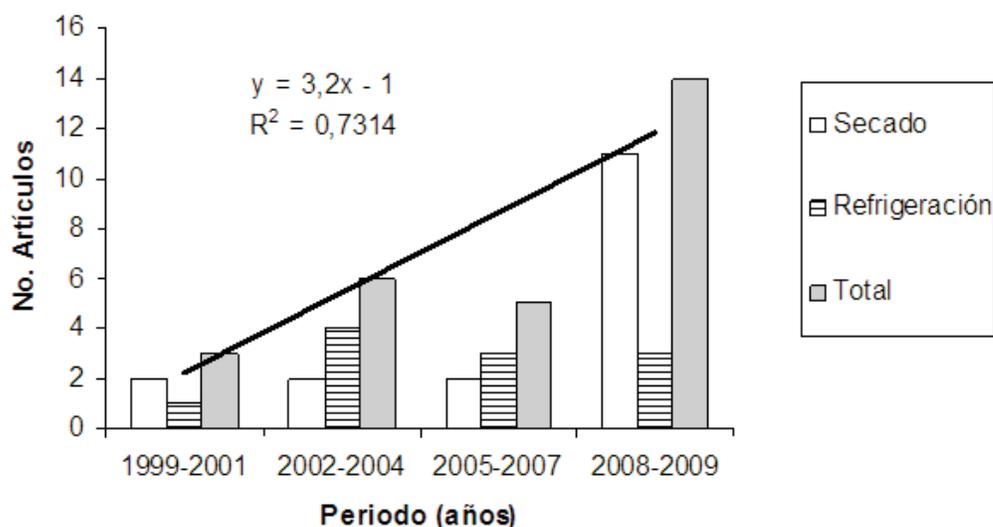


Figura 2 Número de publicaciones de CFD aplicada a las operaciones de transferencia de masa de la industria de alimentos por periodos de tiempo

EBSCO y Scielo sobre operaciones de transferencia de masa analizadas empleando CFD. Haciendo un análisis del uso de CFD en operaciones de transferencia de masa de la industria de alimentos, de la Figura 1 se puede inferir que hay dos áreas que son de amplio interés para los investigadores: el secado y la refrigeración (enfriamiento y congelación).

En la Figura 2 se muestra una comparación entre el número de artículos identificados por periodos de tres años en cada una de las dos operaciones principales identificadas en la Figura 1, durante los años 1999-2009..

La ecuación de la Figura 2 sugiere que aunque el comportamiento no se ajusta a una línea recta, la pendiente positiva indica que para las operaciones de secado y refrigeración (enfriamiento y congelación), ha habido un interés creciente por parte de los investigadores. Así mismo, el aumento en el volumen de publicaciones al respecto, permite que se vaya logrando un estado de madurez en el área.

5. Conclusiones

La literatura revisada permite inferir que la dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta versátil y con cada vez más potencialidad para ser usada en el modelado y análisis de procesos en ingeniería de alimentos tanto para el diseño como para la optimización. La transferencia de masa es un área de la ingeniería de alimentos que por sus características matemáticas es susceptible de modelar mediante CFD siendo el secado y la refrigeración las operaciones de mayor interés. A pesar de los avances en CFD, la interdisciplinariedad notoria parece mostrar que el interés en el área seguirá aumentando y su aplicación aumentará en la medida que se identifiquen operaciones donde esta técnica tenga potencialidad. El software FLUENT®, es el que muestra la mayor aplicación en el análisis de operaciones de transferencia de masa en la industria de alimentos entre los años 1999-2009. Finalmente, las posibles aplicaciones, oportunidades y beneficios del uso de una técnica como CFD en el área de la ingeniería de alimentos está implícito en el hecho de que nuestro país en general y nuestra región en particular, así como en

lo académico e industrial, se pueden beneficiar al empezar a modelar, simular y optimizar tanto las operaciones existentes, como las que se puedan proyectar para dar valor agregado a la amplia gama de productos hortofrutícolas y del sector cárnico donde las operaciones de secado y refrigeración son claves en los procesos productivos de los mismos.

6. Referencias Bibliográficas

Al-Harabsheh, M., Al-Muhtaseb, A.H. & Magee, T.R.A. (2009). Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48, 524-531.

Ben-Nakhi, A., Mahmoud, M.A. & Mahmoud, A.M. (2008). Intermodel comparison of CFD and neural network analysis of natural convection heat transfer in a partitioned enclosure. *Applied Mathematical Modelling* 32, 1834-1847.

Bird, R.B., Stewart, W.E. & Lightfoot, E.N. (2002). *Transport Phenomena*. 2^a. ed. New York: John Wiley & Sons.

Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa: Un enfoque práctico*. 3^a ed. México: McGraw-Hill.

Cengel, Y. & Cimbala, J.M. (2006). *Mecánica de los fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. México: Ed. McGraw-Hill.

Chanteloup, V. & Mirade, P. (2009). Computational fluid dynamics (CFD) modelling of local mean age of air distribution in forced-ventilation food plants. *Journal of Food Engineering* 90, 90-103.

COMSOL. (2008). *COMSOL Multiphysics: User's guide*. USA.

Costa-Novella, E., Calleja, G., Ovejero, G., de Lucas, A., Aguado, J. & Uguina, M.A. (1984) *Ingeniería Química: 2. Fenómenos de transporte*. Madrid: Alhambra. S.A.

Crank, J. (1956). *The mathematics of Diffusion*. London: Oxford University Press.

Curcio, S., Aversa, M., Calabro, V. & Dorio, V. (2008). Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation. *Journal of Food Engineering* 87, 541-553.

De Bonis, M.V. & Ruocco, G. (2007). Modelling local heat and mass transfer in food slabs due to air jet impingement. *Journal of Food Engineering* 78, 230-237.

Delele, M.A., Tijsskens, E., Atalay, Y.T., Ho, Q.T. Ramon, H., Nicolai, B.M. & Verboven, P. (2008). Combined discrete element and CFD modelling of airflow through random stacking of horticultural products in vented boxes. *Journal of Food Engineering* 89, 33-41.

Delele, M.A., Schenk, A. Tijsskens, E., Ramon, H., Nicolas, B.M. & Verboven, P. (2009). Optimization of the humidification of cold stores by pressurized water atomizers based on a multiscale CFD model. *Journal of Food Engineering* 91, 228-239.

Drummond, L. & Sun, D.W. (2008). Temperature evolution and losses during immersion vacuum cooling of cooked beef joints – A finite difference model. *Meat Science* 80, 885-891.

Duchateau, P. & Zachmann, D.W. (1988). *Teoría y problemas de Ecuaciones diferenciales parciales*. México: McGraw-Hill.

Farid, M. & Kizilel, R. (2009). A new approach to the analysis of heat and mass transfer in drying of food products. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48, 217-223.

Farinu, A. & Baik, O-D. (2008). Convective mass transfer coefficients in finite element simulation of deep fat frying of sweetpotato. *Journal of Food Engineering* 89, 187-194.

Foster, A.M., Barrett, R, James, S.J. & Swain, M.J. (2002). Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms. *International Journal of Refrigeration* 25, 1102-1109.

- García-Pérez, J.V., Carcel, J.A., García-Alvarado, M.A. & Mulet, A. (2009). Simulation of grape stalk deep-bed drying. *Journal of Food Engineering* 90, 308-314
- Gekas, V. (2001). Mass transfer modeling. *Journal of Food Engineering* 49, 97-102.
- Goula, A.M. & Adamopoulos, K.G. (2004). Influence of spray drying conditions on residue accumulation- simulation using CFD. *Drying Technology* 22(5), 1107-1128.
- Guiné, R.P.F. (2008). Pear drying: Experimental validation of a mathematical prediction model. *Food and Bioproducts processing* 86, 248-253.
- Halder, A., Dhall, A. & Datta, A.K. (2007). An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying. Part I: Model development and input parameters. *Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing* 85(C3), 209-219.
- Hines, A.L. & Maddox, R.N. (1987) *Transferencia de masa: Fundamentos y aplicaciones*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana. S.A.
- Jun, S. & Puri, V.M. (2005). 3D milk-fouling model of plate heat exchangers using computational fluid dynamics. *International Journal of Dairy Technology* 58 (4), 214-224.
- Kaya, A., Aydin, O. & Dincer, I. (2008). Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of Hayward kiwi fruits (*Actinidia Deliciosa* Planch). *Journal of Food Engineering* 88, 323-330.
- Kondjoyan, A. (2006). A review on surface heat and mass transfer coefficients during air chilling and storage of food products. *International Journal of Refrigeration* 29, 863-875.
- Langrish, T.A.G. & Fletcher, D.F. (2001). Spray drying of food ingredients and applications of CFD in spray drying. *Chemical Engineering and Processing* 40, 345-354.
- Le Page, J.F., Chevarin, C., Kondjoyan, A., Daudin, J. & Mirade, P. (2009). Development of an approximate empirical-CFD model estimating coupled heat and water transfer of stacked food products placed in airflow. *Journal of Food Engineering* 92 (2), 208-216.
- Lin, S.X.Q. & Chen, X.D. (2006). A model for drying of an aqueous lactose droplet using the reactions engineering approach. *Drying Technology* 24, 1329-1334.
- Mirade, P. (2008). Computational fluid dynamics (CFD) modelling applied to the ripening of fermented food products: Basics and advances. *Trends in Food Science y Technology* 19, 472-481.
- Mirade, P., Kondjoyan, A. & Daudin, J. (2002). Three-dimensional CFD calculations for designing large food chillers. *Computers and Electronics in Agriculture* 34, 67-88.
- Mirade, P. & Picgirard, L. (2006). Improvement of ventilation homogeneity in an industrial batch-type carcass chiller by CFD investigation. *Food Research Internacional* 39, 871-881
- Moureh, J. & Derens, E. (2000). Numerical modelling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets in the distribution chain. *International Journal of Refrigeration* 23, 540-552.
- Niamnuy, C., Devahastin, S., Soponronnarit, S. & Raghavan, G.S.V. (2008). Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying in a jet spouted bed dryer. *Chemical Engineering Science* 63, 5503-5512.
-

- Norton, T. & Sun, D.W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD) – an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology* 17, 600-620.
- Peng, M., Vane, L.M. & Liu, S.X. (2004). Numerical simulation of concentration polarization in a pervaporation module. *Separation Science and Technology* 39 (6), 1239-1257.
- Perry, R.H. & Chilton, C.H. (1986). *Biblioteca del ingeniero químico*. 2^a. ed. México: McGraw-Hill.
- Roustapour, O.R., Hosseinalipous, M., Ghobadian, B. Mahaghegh, F. & Azad, N.M. (2009). A proposed numerical-experimental method for drying kinetics in a spray dryer. *Journal of Food Engineering* 90, 20-26.
- Scott, G. & Richardson, P. (1997). The application of computational fluid dynamics in the food industry. *Trends in Food Science & Technology* 8, 119-124.
- Straatsma, J., Van Houwelingen, G., Steenbergen, A.E. & De Jong, P. (1999). Spray drying of food products: 1. Simulation model. *Journal of Food Engineering* 42, 67-72.
- Sun, D.W. (2006). *Computational fluid dynamics in food processing*. Florida: CRC Press.
- Sun, D.W. & Hu, Z. (2002). CFD predicting the effects of various parameters on core temperature and weight loss profiles of cooked meat during vacuum cooling. *Computers and Electronics in Agriculture* 34, 111-127.
- Sun, D.W. & Hu, Z. (2003). CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process. *International Journal of Refrigeration* 26, 19-27.
- Talukdar, P., Iskra, C.R. & Simonson, C.J. (2008). Combined heat and mass transfer for laminar flow of moist air in a 3D rectangular duct: CFD simulation and validation with experimental data. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51, 3091-3102.
- Verboven, P., Flick, D., Nicola, B.M. & Alvarez, G. (2006). Modelling transport phenomena in refrigerated food bulks, packages and stacks: basics and advances. *International Journal of Refrigeration* 29, 985-997.
- Verdurmen, R.E.M., Menn, P., Ritzert, J., Blei, S., Nhumaio, G.C.S., Sorensen, T.S., Gunsing, M., Straatsma, J., Verschueren, M., Sibeijn, M., Schulte, G., Fritsching, U., Baucjhage, K., Tropea, C., Sommerfeld, M., Watkins, A.P., Yule, A.J. & Schonfeldt, H. (2004). Simulation of agglomeration in spray drying installations: The EDECAD project. *Drying Technology* 22 (6), 1403-1461.
- Verdurmen, R.E.M., van Houwelingen, G., Gunsing, M. & Verschueren, M. (2006). Agglomeration in spray drying installations (The EDECAD Project): Stickiness measurements and simulation results. *Drying Technology* 24, 721-726.
- Versteeg, H.K. & Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volumen method*. USA: Prentice-Hall.
- Wang, L. & Sun, D.W. (2003). Recent developments in numerical modelling of heating and cooling processes in the food industry-a review. *Trends in Food Science & Technology* 14, 208-423.
- Wolti-Chanes, J., Vélez-Ruíz, J. & Barbosa-Canovas, G.V. (2003). *Transport phenomena in food processing*. Florida: CRC Press.
- Wolti-Chanes, J., Vergara-Balderas, F. & Bermúdez-Aguirre, D. (2005). Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. *Journal of Food Engineering* 67, 113-128.
-

Woo, M.W., Daud, W.R.W., Mujumdar, A.S., Talib, M.Z.M., Hua, W.Z. & Tazirin, S.M. (2008). Comparative study of droplet drying models for CFD modelling. *Chemical Engineering Research and Design*. 86, 1038-1048.

Xia, B. & Sun, D.W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 34, 5-24.

Xia, B., Sun, D.W., Li, L., Li, X. & Tatsumi, E. (2003). Effect of electro-osmotic dewatering on the quality of tofu sheet. *Drying Technology* 21 (1), 129-145.

Xie, J., Qu, X., Shi, J. & Sun, D.W. (2006). Effects of design parameters on flow and temperature fields of a cold store by CFD simulation. *Journal of Food Engineering* 77; 355-363.

Yesilata, B. & Aktacir, M.A. (2009). A simple moisture model for drying of sliced foods. *Applied Thermal Engineering* 29, 748-752.

Zou, Q., Opara, L.U. & McKibbin, R. (2006). A CFD modeling system for airflow and heat transfer in ventilated packaging for fresh foods: I. Initial análisis and development of mathematical models. *Journal of Food Engineering* 77, 1037-1047.