



SABER. Revista Multidisciplinaria del
Consejo de Investigación de la
Universidad de Oriente

ISSN: 1315-0162

saber@udo.edu.ve

Universidad de Oriente
Venezuela

PATIÑO CARRILLO, LUIS; ESPINOZA, HENRY; COLLADO, MARÍA; VELÁSQUEZ,
OSCAR

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PRESIÓN DINÁMICA DE CO₂ SOBRE LA
DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES Y TEMPERATURA DE LA CERVEZA EN EL
PROCESO DE PASTEURIZACIÓN

SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de
Oriente, vol. 17, núm. 1, enero-junio, 2005, pp. 41-47
Universidad de Oriente
Cumaná, Venezuela

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=427739426006>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PRESIÓN DINÁMICA DE CO₂ SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES Y TEMPERATURA DE LA CERVEZA EN EL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN

STUDY OF THE EFFECT OF CO₂ DYNAMIC PRESSURE ON THE VELOCITY AND TEMPERATURE DISTRIBUTION OF BEER IN THE PASTEURIZATION PROCESS

LUIS PATIÑO CARRILLO*, HENRY ESPINOZA**, MARÍA COLLADO Y OSCAR VELÁSQUEZ

*Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento (CTYM).
Universidad de Oriente. Puerto La Cruz, Venezuela. Fax: 0281-2623271*

*lpatino@udo.edu.ve

**hespinoza@cantv.net

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis del efecto que produce la presión dinámica ejercida por el dióxido de carbono (CO₂) sobre las características de flujo y temperatura en la superficie superior de la cerveza tipo pilsen. Para ello se simuló el comportamiento térmico y fluidodinámico de la misma en el proceso de pasteurización, mediante la solución del modelo matemático conformado por la ecuación de continuidad, las ecuaciones de Navier–Stokes y la ecuación de la energía. Estas ecuaciones fueron resueltas en régimen transitorio y en coordenadas cilíndricas axisimétricas conjuntamente con las condiciones iniciales y de borde que también varían con el tiempo. La solución numérica del modelo matemático se halló a través de un código de Volúmenes Finitos CFX 9.3™. Se obtuvo de esta manera el perfil de velocidades y de temperatura de la cerveza en régimen transitorio. Se constató que la presión de CO₂ produce un aumento de las velocidades de las partículas de cerveza y el incremento genera un aumento en la transferencia de calor, lo que trae como consecuencia que el fluido se caliente o se enfrie más rápido.

PALABRAS CLAVES: Pasteurización de Cerveza, Transferencia de Calor, Convección Natural

ABSTRACT

This work reports the effect of CO₂ dynamic pressure on the flow and temperature of the upper surface of pilsen-type beer. The thermal and hydrodynamic behavior of the beer upon pasteurization was modeled by applying the equations of energy, continuity, and Navier-Stokes, solved through transient states analysis and cylindrical axysymmetric coordinates application together with time-dependant initial and boundary conditions. The numerical solution to the mathematical model was found resorting to a finite volume code. The transient state temperature and speed profiles of the beer were thus obtained. We ascertained that the CO₂ pressure produces an increase in the speed of the beer particles and an increase in the heat transfer, resulting in the fluid getting warmer or colder much faster.

KEY WORDS: Beer pasteurization, heat transfer, natural convection

INTRODUCCIÓN

La pasteurización consiste en la destrucción vital de los microorganismos contenidos en la cerveza con la aplicación de altas temperaturas (generalmente 60 °C) y manteniendo esta temperatura por un período de tiempo que sea suficiente para destruir las bacterias dañinas, sin cambiar la composición, sabor y valor nutritivo del producto. Este proceso industrialmente se lleva a cabo en una equipo de grandes dimensiones llamado Pasteurizador tipo Túnel. En él las botellas pasan a través de un túnel o cámara de rociado de agua, cuya temperatura va

ascendiendo a medida que avanza la botella, hasta alcanzar en la mitad del proceso una temperatura de aproximadamente 60 °C. A partir de ese momento comienza la etapa de enfriamiento donde se le disminuye gradualmente la temperatura al agua rociada hasta aproximadamente 25 °C.

El nivel de pasteurización de la cerveza se mide a través del cálculo de las llamadas Unidades de Pasteurización (UP), la cual físicamente representan la acción letal a 60 °C durante un (01) minuto, sobre los microorganismos presentes en la cerveza durante el proceso.

Matemáticamente las Unidades de Pasteurización se calculan a través de la siguiente ecuación:

$$UP = t \cdot 1,393^{(T_b - 60)} \quad (1)$$

Donde t es el tiempo de exposición de la cerveza en el proceso y T_b es la temperatura en °C del centro geométrico del envase del producto.

Gracias a la transferencia de calor entre el agua rociada y el fluido contenido en el envase se genera un gradiente de temperatura en el seno de la cerveza, produciendo el movimiento relativo de las partículas y generando la convección natural. En general existe convección forzada entre el agua rociada y la superficie externa del envase, conducción de calor a través de la pared del envase y convección libre entre la pared interna del envase y el fluido interno.

La solución numérica de problemas de convección libre ha sido ampliamente estudiada por diferentes autores. Barakat y Clark (1966) resolvieron numéricamente problemas de esta área y sus resultados fueron comparados con mediciones experimentales de temperatura. Sun y Oosthuizen (1989) realizaron simulaciones numéricas para determinar el efecto de varios parámetros físicos en los campos de flujos y temperatura.

En el análisis de fenómenos de convección libre utilizando cerveza como fluido estudiado, Reyes *et al* (1996), presenta un análisis del comportamiento térmico y fluidodinámico de la cerveza en el proceso de enfriamiento, obteniendo la distribución de temperatura y el campo de flujo. Un trabajo muy similar se presenta en Reyes *et al* (1998) el cual difiere del anterior en el método numérico utilizado. En el área de pasteurización de cerveza, Brandon *et al* (1984) propone un modelo de flujo en el cual se aprecian tres zonas diferenciadas en las características del campo de flujo: una región estrecha cerca de la pared del envase donde el fluido asciende gracias a los gradientes de temperaturas, una zona de mezcla en la parte superior del envase y finalmente una zona fría en el centro del envase.

Navarro y Lacoa (1998) desarrollaron un simulador del perfil de temperaturas de la cerveza en el proceso de pasteurización. En este estudio se plantea un modelo de proceso a través de un análisis concentrado, considerando una sola temperatura en todo el envase. También se plantea una metodología para el cálculo de los coeficientes de convección forzada y convección libre entre el agua rociada y el fluido interno.

Recientemente Patiño *et al* (2001) determinaron numéricamente el perfil de velocidades y la distribución de temperatura en la cerveza en el proceso de pasteurización. Para esto desarrollaron un modelo monofásico en el cual se consideró que la superficie superior de la cerveza contenida en el envase está a presión constante y atmosférica. La determinación de los perfiles de velocidad y temperatura en el seno del fluido es primordial para realizar el cálculo de las unidades de pasteurización. Es importante resaltar que realmente en la superficie superior de la cerveza envasada hay una cantidad de CO₂, el cual cambia su presión y temperatura cuando la cerveza está pasteurizándose. Este efecto de la presión dinámica de CO₂ no fue tomado en consideración en la investigación de Patiño *et al* (2001).

El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto que tiene la presión dinámica de CO₂ sobre el perfil transitorio de velocidades y temperaturas de la cerveza en el proceso de pasteurización. Para ello se compararon las soluciones numéricas de un modelo monofásico con las soluciones numéricas de un modelo bifásico que toma en consideración la presencia de CO₂ sobre la superficie superior de la cerveza contenida en el envase. Estos modelos matemáticos son resueltos numéricamente a través del método de los Volúmenes Finitos, y están constituidos por las ecuaciones diferenciales que rigen el fenómeno de convección libre en el seno de los fluidos contenidos en el envase. Para las simulaciones se utilizó un software de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) llamado CFX.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación teórica se desarrolló un modelo matemático el cual se resolvió numéricamente para obtener los perfiles transitorios de velocidad y temperatura en la cerveza contenida en el envase durante el proceso de pasteurización. El envase corresponde a una botella de vidrio de 222 cm³ de volumen y cuyos datos geométricos se pueden observar en la figura 3.

Modelo matemático del Proceso Estudiado

El modelo matemático del problema planteado fue dividido en dos partes: las ecuaciones que rigen el comportamiento dinámico del mismo y las condiciones del problema (iniciales y de borde).

Ecuaciones gobernantes

Tomando como fluidos en estudio, la cerveza y el gas carbónico contenidos en el envase, suponiendo que el líquido es incompresible y newtoniano en el cual las propiedades tales como densidad (ρ), viscosidad absoluta

(μ), calor específico (C_p), coeficiente de expansión volumétrica (β) y conductividad térmica (k) solo varían con la temperatura. Considerando que el CO₂ es un fluido newtoniano y compresible. Suponiendo adicionalmente régimen transitorio y utilizando la aproximación de Boussinesq (Incropera, 1999), las ecuaciones de variación en coordenadas cilíndricas y régimen laminar pueden expresarse como:

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) = 0 \quad (2)$$

Ecuación de Cantidad de Movimiento en la dirección axial:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho rvu) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \mu \frac{\partial u}{\partial r}\right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \beta T \end{aligned} \quad (3)$$

Ecuación de Cantidad de Movimiento en la dirección radial:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho rvv) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \mu \frac{\partial v}{\partial r}\right) - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{2 \mu v}{r^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Ecuación de la Energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho rv T) = \\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial r}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

donde:

u [m/s] es la velocidad del fluido en la dirección axial (x)
 v [m/s] es la velocidad del fluido en la dirección radial (r)

T [K] es la temperatura del fluido

t [s] es el tiempo

p [Pa] es la presión del fluido

g [m/s²] es la aceleración de la gravedad.

ρ [kg/m³] es la densidad

μ [Pa s] es la viscosidad absoluta

C_p [J/Kg K] es el calor específico

β [1/K] es la coeficiente de expansión volumétrica

k [W/m²K] es la conductividad térmica

Las ecuaciones arriba descritas fueron resueltas tanto para la cerveza como para el gas ubicado en la parte interna superior del envase, suponiendo que en ningún momento el CO₂ está mezclado con el líquido, idealizando el sistema como dos fluidos inmiscibles separados por una interfase indeformable y continua. Es importante indicar que la resolución de las ecuaciones de continuidad (ecuación 2) y movimiento en ambas direcciones (ecuaciones 3 y 4) permite determinar el campo de flujo, es decir la presión y a las componentes axial y radial de la velocidad. Adicionalmente la resolución de la ecuación de energía (ecuación 5) permite obtener el perfil de temperatura del fluido.

Condiciones del Problema

Las condiciones iniciales son velocidades radiales y axiales nulas, y una temperatura homogénea en todo el dominio (T_0).

Las condiciones de borde asociadas al problema son (ver Fig. 1 y Fig. 2):

- Las velocidades u y v en las paredes son nulas.
- La velocidad u es máxima y la velocidad v es nula en el eje de simetría.
- Las velocidades u y v en la superficie superior son nulas.
- La temperatura en el eje de simetría es mínima.
- El flujo de calor es nulo en la pared inferior.
- En la superficie superior el flujo de calor es nulo.
- En la interfase la velocidad, la temperatura y el flujo de calor son continuas.
- En la interfase no hay flujo de masa y se mantiene indeformada.
- En las paredes laterales el flujo de calor se expresa de la siguiente manera:

$$-kA_k \frac{\partial T}{\partial r} = UA(T - T_\infty) \quad (6)$$

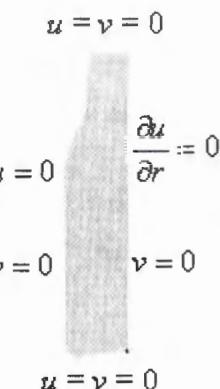


Figura 1. Condiciones de borde hidrodinámicas

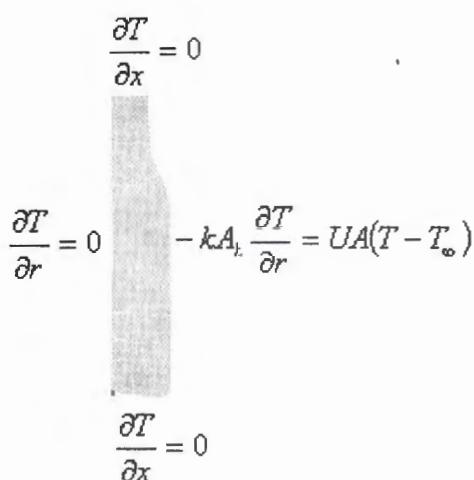


Figura 2. Condiciones de borde térmicas

Donde U es el coeficiente global de transferencia de calor por conducción en la pared y convección forzada externa, A_k es el área de contacto entre el fluido interno y la superficie sólida interna, A es el área global de transferencia de calor, T_∞ es la temperatura del agua de rociado y r es la coordenada radial genérica. Las áreas A_k y A son calculadas internamente a través del software utilizado para resolver el modelo, y para ello solo se necesita la geometría del dominio (botella). Es importante resaltar que tanto U como T_∞ tienen valores que varían con el tiempo. Para el cálculo de U se tomó la metodología aplicada por Navarro y Lacoa (1998). En la Tabla 1. se observan los valores de los coeficientes globales de transferencia de calor (U) y las temperaturas de rociado (T_∞). El proceso involucra: calentamiento desde la temperatura inicial (302 K) hasta la temperatura de pasteurización (335 K) y enfriamiento desde la temperatura de pasteurización hasta la temperatura final (303 K)

Tabla 1. U y T_∞ usados en la simulación

Etapa	Intervalo de Tiempo (s)	U(W/m²K)	T_∞ (K)
1	0 – 250	146	302
2	250 – 460	172	314
3	460 – 630	165	319
4	630 – 1160	173	335
5	1160 – 1430	180	333
6	1430 – 1600	166	321
7	1600 – 1810	165	316
8	1810 – 2060	160	303

Las propiedades termofísicas de la cerveza utilizadas para resolver el modelo matemático fueron las siguientes. $\rho = 999 \text{ Kg/m}^3$; $\beta = 1.74\text{E-}04 \text{ 1/K}$; $C_p = 4186 \text{ J/(Kg*K)}$; $k = 0.591 \text{ W/(m*K)}$; $\mu = 2.2\text{E-}03 \text{ Pa s}$. Las propiedades termofísicas del CO₂ utilizadas para resolver el modelo matemático fueron las siguientes. $\rho = 1.66 \text{ Kg/m}^3$; $\beta = 0.003 \text{ 1/K}$; $C_p = 872 \text{ J/(Kg*K)}$; $k = 0.0181 \text{ W/(m*K)}$; $\mu = 1.56\text{E-}05 \text{ Pa s}$.

Solución Numérica

Las ecuaciones diferenciales con sus respectivas condiciones de borde e iniciales descritas en el modelo matemático fueron resueltas a través de un código comercial del área de la Dinámica de los Fluidos Computacional (CFD). El Software utilizado tiene por nombre CFX versión 4.3, el cual basa la solución en el método de los Volúmenes Finitos utilizando una discretización estructurada coincidente con las fronteras, detalles esta metodología se observa en Maliska (1995). Los flujos convectivos y difusivos en las interfaces de los volúmenes se calcularon a través del esquema de interpolación Híbrido y el procedimiento de acoplamiento Presión – Velocidad, en las ecuaciones de Navier-Stokes, fue el SIMPLE (Semi – Implicit Pressure Linked Equation) (Patankar, 1980). La validez de este método en problemas de convección libre ha sido ampliamente comprobada y algunos ejemplos pueden verificarse en Maliska (1995). El régimen transitorio fue implementado a través de un esquema totalmente implícito y el criterio de convergencia fue establecido tomando el máximo residuo en la ecuación de continuidad.

Se utilizó una temperatura uniforme de 5 °C como condición inicial térmica y velocidades axiales y radiales nulas como condición inicial hidrodinámica. Los factores de relajación usados en las corridas fueron de 0,3 para las velocidades axiales y radiales; 0,45 para la presión y 0,07 para la Temperatura.

La solución fue obtenida inicialmente para un sistema constituido por líquido únicamente, y posteriormente se realizaron las corridas tomando en cuenta el sistema cerveza-CO₂. Para el caso inicial el dominio fue dividido con una malla de 121 volúmenes en la dirección axial y 18 volúmenes en la dirección radial, lo cual generó una discretización de 2178 volúmenes finitos, ver Fig. 3. El periodo de tiempo total simulado fue de 2060 segundos (34,33 minutos) y el intervalo de tiempo utilizado fue 10 segundos. El tiempo de ejecución de la simulación fue de aproximadamente tres horas, en un ordenador Pentium 450 MHz con 256 Mbytes de memoria RAM.

Para el sistema bifásico el dominio fue dividido con una malla de 118 volúmenes en la dirección axial y 18 volúmenes en la dirección radial, lo cual generó una discretización de 2124 volúmenes finitos. El periodo de tiempo total simulado fue de 2060 segundos (34,33 minutos) y el intervalo de tiempo utilizado fue 10 segundos. El tiempo de ejecución de la simulación fue de aproximadamente cuatro horas y media, en el mismo computador.

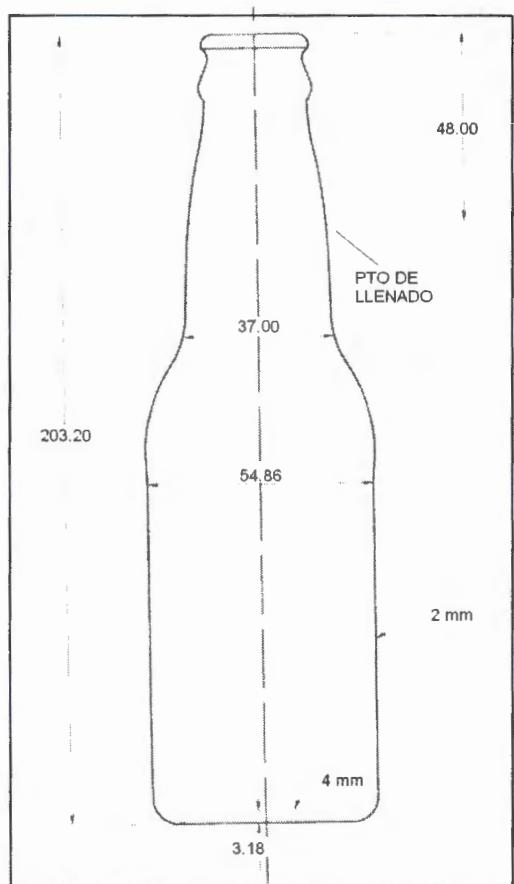


Figura 3. Datos geométricos del envase de cerveza

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 4(a), 4(b), 4(c) y 4(d) pueden observarse los perfiles de velocidades y las distribuciones de temperaturas del sistema modelado como un fluido monofásico. En las figuras 4(e), 4(f), 4(g) y 4(h) se observan estos mismos perfiles pero modelando el sistema con los dos fluidos (cerveza y dióxido de carbono). Las figuras 4(a) y 4(e) representan el comportamiento de los sistemas en una de las etapas de calentamiento, las figuras 4(b) y 4(f) en la etapa de pasteurización (temperatura de rociado aproximadamente 61 °C) y en las figuras 4(c), 4(d), 4(g) y 4(h) se observa el comportamiento fluidodinámico de la cerveza en la etapa de enfriamiento. Para ambos casos (monofásico y bifásico) se observa en las etapas de calentamiento y pasteurización la capa límite hidrodinámica ascendiendo debido a que el fluido en esta zona está más frío que la pared, generando así las fuerzas de flotación ascendentes propias de la convección libre predominante en la dirección vertical. Es por esto que en estas etapas de calentamiento las temperaturas en zonas elevadas del envase son mayores que en zonas inferiores como puede observarse en las mismas figuras. También se aprecia en estas figuras que los cambios de temperatura (o gradiente de temperatura) en la dirección radial son de magnitud inferior que en la otra dirección, lo que demuestra que la conducción de calor predomina sobre la convección en esta dirección radial. En las etapas de enfriamiento se observa que la capa límite hidrodinámica es descendente generando una velocidad de disminución de temperatura mayor en zonas inferiores del envase, ver figuras 4(c), 4(d), 4(g) y 4(h).

En concordancia con los resultados mostrados en Brandon *et al* (1982) se observa un modelo de flujo para la transferencia de calor donde existe una capa límite que sube a lo largo de la pared caliente (etapa de calentamiento), una región de mezcla en la parte superior del envase y un núcleo medio ubicado debajo de la región de mezcla. La región de mezcla se ubica aproximadamente en el 10% de la parte superior del fluido, y la capa límite representa una región muy delgada donde prevalece gradientes de velocidad y temperaturas apreciables perpendiculares a la pared interna de la botella.

Los resultados del presente artículo demuestran que la temperatura de la cerveza cambia punto a punto, debido a que el calor no se distribuye de la misma manera a lo largo y ancho del envase, ya que el envase es cilíndrico pero de sección transversal variable. Observando la ecuación para el cálculo de las unidades de pasteurización (Ec. 1.), se puede inferir que las unidades de pasteurización también cambian punto a punto en el envase (suponiendo

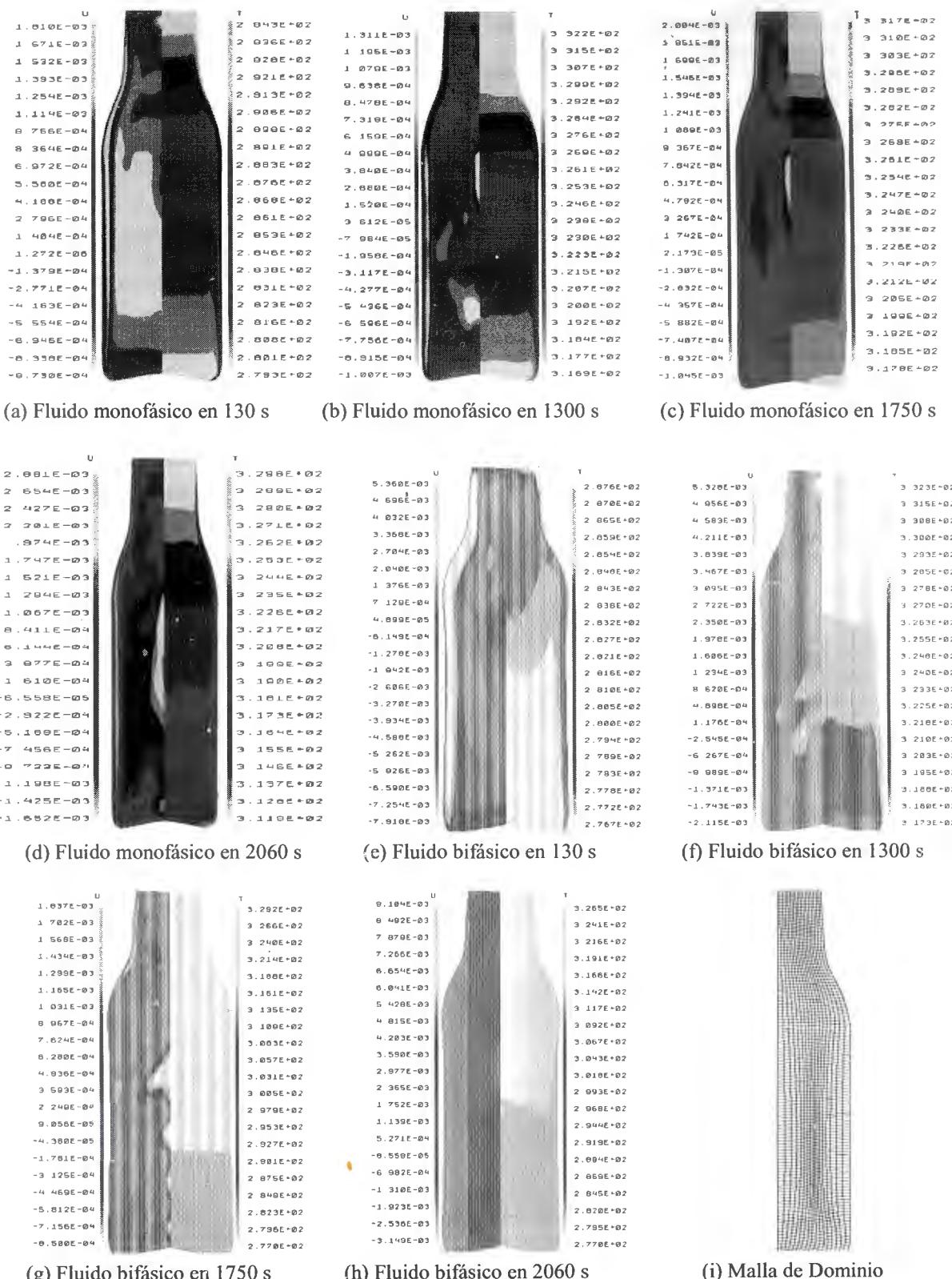


Figura 4. Perfiles de velocidad y temperatura para los casos mono fásicos y bifásicos y distintos tiempos

que Tb es la temperatura de un punto específico de la cerveza), lo que hace pensar que para un proceso determinado, la letalidad de la pasteurización es una función de la ubicación del producto, por lo que para lograr valores determinados de UP, dependiendo del punto del envase, el tiempo que se requiere es distinto. Estos resultados concuerdan también con lo descrito en Brandon *et al* (1984).

En las figuras arriba indicadas se observa que las velocidades del fluido son mayores en las simulaciones realizadas al sistema bifásico, infiriéndose que la columna de CO₂ va a producir un mayor gradiente de presiones en la cerveza, aumentando la velocidad de las partículas de fluido. Este incremento en el campo de flujo debido al aumento de la diferencia de presión sumado al movimiento de las partículas causado por las fuerzas de flotación propias de la convección libre generan un incremento en el transporte de la energía. De acuerdo a lo indicado, en los instantes cuando se está produciendo el calentamiento de la cerveza, las partículas de fluido en el modelo bifásico tienen mayor temperatura que en el monofásico, y en los momentos cuando se está generando el enfriamiento el modelo monofásico tienen mayores temperaturas que el bifásico. Lo anterior puede verificarse en las figuras 4(a) hasta la 4(h).

CONCLUSIÓN

La transferencia de calor en la cerveza es predominante en la dirección axial, presentando amplios gradientes de temperaturas en esta dirección. Solamente en una región muy delgada (capa límite) existen gradientes apreciables de temperatura en la dirección radial.

En la etapa de calentamiento, puntos ubicados en la parte superior del envase alcanzan temperaturas más elevadas que en puntos inferiores. De manera similar en la etapa de enfriamiento puntos inferiores del envase se enfrian con mayor velocidad.

El principal efecto causado por la columna de CO₂ sobre la cerveza es el aumento de las velocidades de las partículas debido al incremento de la diferencia de presión. Este incremento en el campo de flujo produce un aumento en la transferencia de calor, lo que trae como consecuencia que el fluido se calienta o se enfria más rápido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARAKAT, H. & CLARK, J. 1966. Analytical and Experimental Study of the Transient Laminar Natural Convection Flows in Partially Filled Liquid Containers. Proceeding

of the third international Heat Transfer Conference. New Jersey. 2: 152-162.

BRANDON, H., PELTON, P. & STAACK, G. 1982. State of the art Methodology for evaluation of pasteurizer Heating and cooling Processes. MBAA. Tech. Quart. 19: 34-40.

BRANDON, H., STAACK, G., GARDNER, R. & HULING, J. 1984. Time dependent Modeling of in-Package Pasteurization. MBAA. Tech. Quart. 21: 153-159.

CFX 4.3. 1999: CFX 4.3 Flow Solver User Guide, AEA Technology, Oxfordshire, UK, 1999.

INCROPERA, F. & DEWITT, D. 1999. Fundamentos de Transferencia de Calor. Prentice may, cuarta edición, México. 482 – 501.

MALISKA, C. 1995. Transferencia de Calor e Mecánica dos Fluidos Computacional. LTC Editora, Brazil. 81 - 102

NAVARRO, M. y LACOA, U. 1998. Desarrollo de un modelo de simulación para el Proceso de Pasteurización de la Cerveza. Séptimo Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia. (LATCYM 98). Salta – Argentina. 1: 228-232.

PATANKAR, S. 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation, Mc Graw-Hill. Washington. 45 – 61.

PATIÑO, L., ESPINOZA, H. y VELASQUEZ, O. 2001. Estudio Numérico de la Transferencia de Calor en el Proceso de Pasteurización de Cerveza. Revista Ciencia e Ingeniería, Universidad de los Andes. 3:3: 21 – 29.

REYES, M., ALDANA, J. y MATOS, E. 1996. Simulación del Proceso de enfriamiento de Tanques de fabricación de Cerveza mediante el Método de Elementos Finitos Basados en Volúmenes de Control. Avances en Ingeniería Mecánica. JOCIME. Puerto La Cruz – Venezuela. 1: 173-181.

REYES, M., ROMERO A., SIU, G., VARGAS, J. y MATOS, E. 1998. Modelado y optimización del Proceso de enfriamiento de la cerveza en los tanques cilindro-cónicos. II Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Mérida – Venezuela. 1: 124 – 131.

SUN, J. & OSTHUIZEN, P. 1989. Transient Natural Convection in a Vertical Cylinder with a specified wall Flux. National Heat Transfer Conference Heat Transfer in Convective Flows. Philadelphia. HTD. 17: 305-314.