

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

L. A. Patiño*, O. Velásquez y H. Espinoza**

Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento (CTYM), Instituto de Investigación y Desarrollo Anzoátegui, Universidad de Oriente. Puerto La Cruz, Venezuela. Fax: 0281-2676885.

*lpatino@anz.udo.edu.ve ** hespinoz@ci.udo.edu.ve

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis del efecto que produce la presión dinámica ejercida por el dióxido de carbono (CO₂) sobre la superficie superior de la cerveza a través de la simulación del 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 son 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 halla a través de un código de Volúmenes Finitos (CFX 4.3TM). Se obtiene de esta manera el perfil de velocidades y de temperatura de la cerveza en régimen transitorio conjuntamente con las Unidades de Pasteurización. Los resultados obtenidos son comparados con datos experimentales y resultados de otras investigaciones concordando satisfactoriamente.

ABSTRACT

In this work an analysis of the effect appears that produces the dynamic pressure exerted by carbon dioxide (CO₂) on the upper surface of beer through the simulation of the thermal and fluidynamic behavior of the same one in the pasteurization process, by means of the solution of the mathematical model conformes by the equation of continuity, the equations of Navier – Stokes and the equation of energy. These equations are solved in transient state and in axisymmetrical cylindrical coordinates jointly with its initial and boundary conditions that also varies with time. The numerical solution of the mathematical model is through a code of Finite Volumes (CFX 4.3TM). In this way the temperature and velocity profile is obtained in transient state. The obtained results are compared with experimental datas and results of other investigations agreeing satisfactorily.

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 dafinas, 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:

$$UP = t \cdot 1,393^{(T_1 - 60)} \quad (1)$$

donde t es el tiempo de exposición de la cerveza en el proceso y T_1 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 deferentes 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, se tiene el trabajo de Reyes et al (1996), en él se presenta un análisis del comportamiento térmico y fluidodinámico de la cerveza en el proceso de enfriamiento del mosto, obteniendo la distribución de temperatura y el campo de flujo. Un trabajo muy similar se presenta en Reyes et al (1998) 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 la que se aprecian tres zonas diferenciadas en las características del campo de flujo. Una región delgada 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.

Recientemente Lacoa y Navarro (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.

En este trabajo se obtiene el perfil transitorio de velocidades y temperaturas a través de la solución numérica mediante el método de los Volúmenes Finitos de las ecuaciones diferenciales que rigen el fenómeno de convección libre en el seno de los fluidos contenidos en el envase. Es importante resaltar que en la resolución del modelo matemático se toma en cuenta la presión producida por el CO₂ sobre la superficie superior de la columna de cerveza. Esta presión de dióxido de carbono es variable en el tiempo, debido a que su temperatura también cambia transitoriamente.

MODELO MATEMÁTICO DEL PROCESO ESTUDIADO.

El modelo matemático del problema planteado es 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 donde 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 CO_2 es un fluido newtoniano y compresible. Suponiendo adicionalmente régimen transitorio y utilizando la aproximación de Boussinesq, las ecuaciones de variación en coordenadas cilíndricas y régimen laminar pueden expresarse como:

Ecuación de Continuidad:

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

Ecuación de Cantidad de Movimiento en la dirección axial:

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

Ecuación de Cantidad de Movimiento en la dirección radial:

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

Ecuación de la Energía:

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

donde:

u es la velocidad del fluido en la dirección axial (x)

v es la velocidad del fluido en la dirección radial (r)

T es la temperatura del fluido

t es el tiempo

p es la presión del fluido

g es la aceleración de la gravedad.

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 CO_2 está mezclado con el líquido, idealizando el sistema como dos fluidos inmiscibles separados por una interface indeformable y continua.

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 interface la velocidad, la temperatura y el flujo de calor son continuas.
- En la interface no hay flujo de masa y se mantiene indeformada.
- En las paredes laterales el flujo de calor se expresa de la siguiente manera:

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

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 y T_∞ es la temperatura del agua de rociado. Es importante resaltar que tanto U como T_∞ tienen valores que varían con el tiempo. Para el cálculo de U se tomo 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_∞).

$$u = v = 0$$

$$u = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0$$

$$v = 0 \quad v = 0$$

$$u = v = 0$$

Fig. 1. Condiciones de borde hidrodinámicas

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad -kA_k \frac{\partial T}{\partial r} = UA(T - T_\infty)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Fig. 2. Condiciones de borde Térmicas

Tabla 1. U y T_∞ usados en la simulación

Etapas	Intervalo de Tiempo (s)	U (W/m ² K)	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

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 fue el 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 calculan a través del esquema de interpolación Híbrido y el procedimiento de acoplamiento Presión – Velocidad, en las ecuaciones de Navier-Stokes, utilizado fue el SIMPLE (Semi – Implicit Pressure Linked Equation), detalles de este método pueden observarse en Patankar, 1980. La validez de este método en problemas de convección libre esta 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. 11. 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.

RESULTADOS

En las figuras 3, 4, 5 y 6 pueden observarse los perfiles de velocidades y las distribuciones de temperaturas del sistema modelado como un fluido monofásico. En la figura 7, 8, 9 y 10 se observan estos mismos perfiles pero modelando el sistema con los dos fluidos (cerveza y dióxido de carbono). Las figuras 3 y 7 representan el comportamiento de los sistemas en una de las etapas de enfriamiento, las figuras 4 y 8 en la etapa de pasteurización (temperatura de rociado aproximadamente 61 °C) y en las figuras 5, 6, 9 y 10 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 limite hidrodinámica ascendiendo debido a que el fluido en esta zona esta 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 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 limite hidrodinámica es descendente generando una velocidad de disminución de temperatura mayor en zonas inferiores del envase, ver figuras 5, 6, 9 y 10.

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 limite 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 limite 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, 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 arribas indicadas se observa que las velocidades del fluido son mayores en la simulaciones realizada al sistema bifásico, infiriéndose que la columna de CO_2 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 deben tener mayor temperatura que en el monofásico, y en los momentos cuando se está generando el enfriamiento el modelo monofásico debe tener mayores temperaturas que el bifásico. Lo anterior puede verificarse en las figuras 3 hasta la 10.

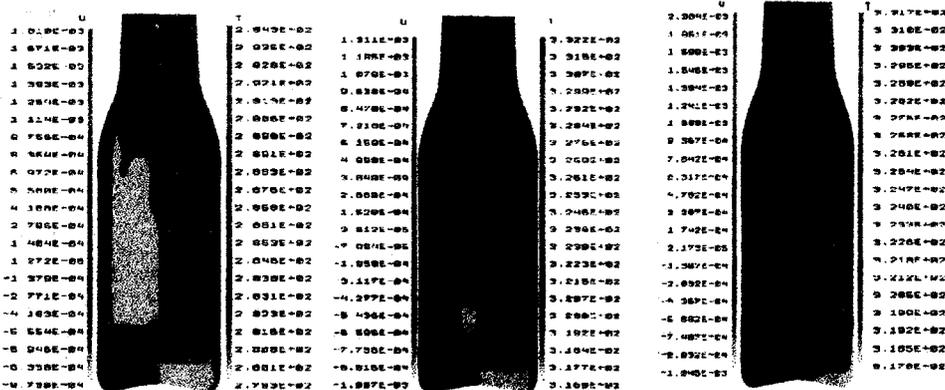


Fig. 3. Fluido monofásico en 130 s Fig. 4. Fluido monofásico en 1300 s Fig. 5. Fluido monofásico en 1750 s

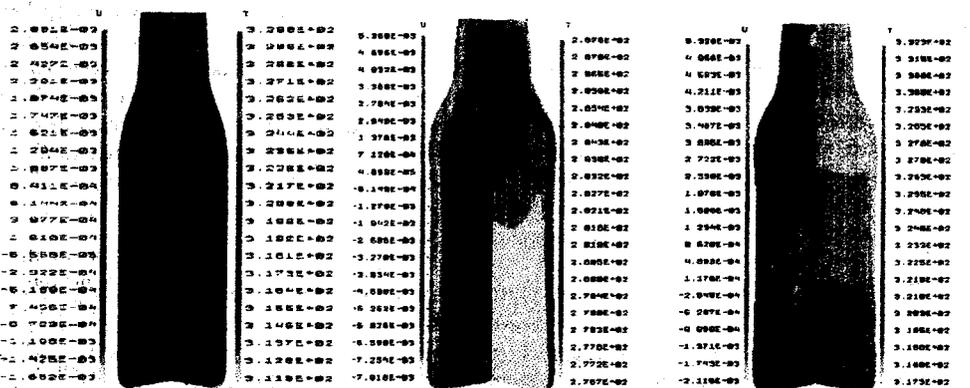


Fig. 6. Fluido monofásico en 2060 s Fig. 7. Fluido bifásico en 130 s Fig. 8. Fluido bifásico en 1300 s

CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis del comportamiento térmico y fluidodinámico de la cerveza en el proceso de pasteurización mediante la simulación numérica a través del método de los Volúmenes Finitos, y las conclusiones obtenidas son las siguientes.

La transferencia de calor en la cerveza es predominante en la dirección axial, presentando amplios gradientes de temperaturas en esta dirección. Observando que solo en una región muy delgada (capa limite) 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 enfrían con mayor velocidad.

En casos reales las unidades de pasteurización medidas a través de la temperatura en el centro geométrico arrojan resultados distintos que el cálculo de la UP tomando en consideración cada uno de los puntos del envase por separado, ya que las unidades de pasteurización son función de la posición.

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 caída 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 caliente o se enfría mas rapido.

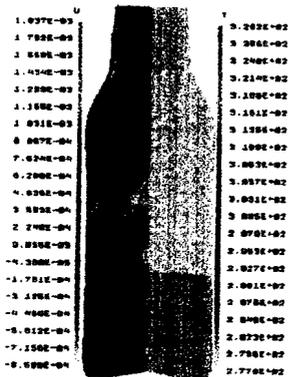


Fig. 9. Fluído bifásico en 1750 s

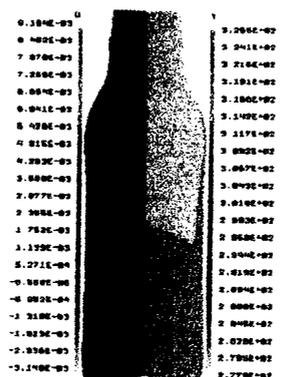


Fig. 10. Fluído bifásico en 2060 s



Fig. 11 Malla de Dominio

REFERENCIAS

- [1] 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, Vol. 2, pp. 152-162.
- [2] Brandon, H., Pelton, P., Stack, G. 1982. "State of the art Methodology for evaluation of pasteurizer Heating and cooling Processes". MBAA. Technical Quarterly. Vol. 19, pp. 34-40.
- [3] Brandon, H., Stack, G., Gardner, R., Huling, J. 1984. "Time dependent Modeling of in-Package Pasteurization". MBAA. Technical Quarterly. Vol. 21, pp. 153-159.
- [4] Maliska, C. 1995. "Transferencia de Calor e Mecánica dos Fluidos Computacional". LTC Editora, Brazil.
- [5] Navarro, M., 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). Vol. 1, pp. 228-232.

[6]Patankar, S. 1980. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". Hemisphere Publishing Corporation, Mc Graw-Hill. Washinton.

[7]Reyes, M., Aldana, J., 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. pp. 173-181.

[8]Reyes, M., Romero A., Sin, G., Vargas, J., Matos, E. 1998. "Modelado y optimización del Proceso de enfriamiento de la cerveza en los tanques cilindro-conicos". II Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.

[9]Sun, J., Oosthuizen, 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. Vol. 17, pp.305-314.

[10]CFX 4.3: "CFX 4.3 Flow Solver User Guide", AEA Technology, Oxfordshire, UK, 1999.