

Estudio numérico de la transferencia de calor en la cerveza en el proceso de pasteurización

Numerical study of beer heat transfer in the pasteurization process

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

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

* hespinoz@ci.udo.edu.ve

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis térmico y fluidodinámico de la cerveza en el proceso de pasteurización a través de la simulación numérica del campo de flujo y transporte de energía. Los perfiles de velocidades y las distribuciones de temperatura en régimen transitorio son obtenidos 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) utilizando un esquema de interpolación híbrido para aproximar los flujos difusivos y convectivos en las interfaces de los volúmenes y el procedimiento de acoplamiento Presión – Velocidad usado en las ecuaciones de movimiento fue el SIMPLE. Con las distribuciones de temperaturas fueron calculadas las Unidades de Pasteurización determinándose que éstas dependen de la posición en el envase y su valor difiere del calculado tomando como referencia el centro geométrico. Adicionalmente los resultados obtenidos son comparados con datos experimentales y resultados de otras investigaciones concordando satisfactoriamente.

Palabras claves: Pasteurización, Dinámica de los Fluidos Computacional, Soluciones Numéricas, Transferencia de Calor.

Abstract

In this work a fluidynamic and thermal analysis of the beer in the pasteurization process is presented through the numerical simulation of the flow field and energy transport. The velocities profiles and the temperature distributions in transient state are obtained by means of the solution of the mathematical model conformed by the continuity equation, the Navier - Stokes equations and the energy equation. These equations are solved in transient state and in axisymmetrical cylindrical coordinates jointly with the initial and boundary that also vary with time. The numerical solution of the mathematical model is made through a Finite Volume code (CFX 4.3TM) using a hybrid interpolation scheme to approach the diffused and convective flows in the interfaces of the volumes and the procedure of Pressure - Speed joining used in the momentum equations was the SIMPLE. With the temperatures distributions were calculated the Pasteurization Units being determined that these depend on the position in the container and their values differs of the one calculated taking like reference the geometric center. Additionally the obtained results are compared with experimental data and results of other investigations agreeing satisfactorily.

Key words: Pasteurization, Computational Fluids Dynamics, Numerical Solutions, Heat Transfer.

1 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 un 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 existen tres mecanismos de transferencia de calor, 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 obtenido experimentalmente 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 la distribución transitoria de velocidades y temperaturas en el seno del fluido contenido en el envase a través de la solución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales que conforman el modelo matemático mediante el método de los Volúmenes Finitos. Adicionalmente se realiza el cálculo de las Unidades de Pasteurización en el centro geométrico del envase y se comparan con el valor de estas mismas unidades pero calculadas en varios puntos del recipiente.

2 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 iniciales y de contorno.

2.1 Ecuaciones Gobernantes

Tomando como fluido en estudio, la cerveza contenida 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. Suponiendo adicionalmente que el sistema está en 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.

2.1 Condiciones del Problema

Como condiciones iniciales, es decir, al momento que la botella entra al pasteurizador se supone que el fluido tiene velocidades radiales y axiales nulas, y una temperatura homogénea en todo el dominio (T_0).

Las condiciones de borde asociadas al problema son para todo instante de tiempo (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 las paredes laterales el flujo de calor se expresa de la siguiente manera:

$$-k A_k \frac{\partial T}{\partial r} = UA (T - T_\infty)$$

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_∞).

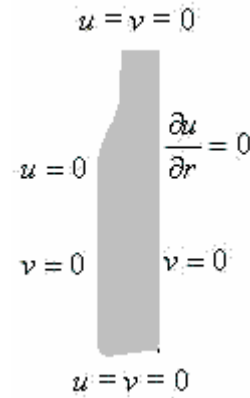


Fig. 1. Condiciones de borde hidrodinámicas

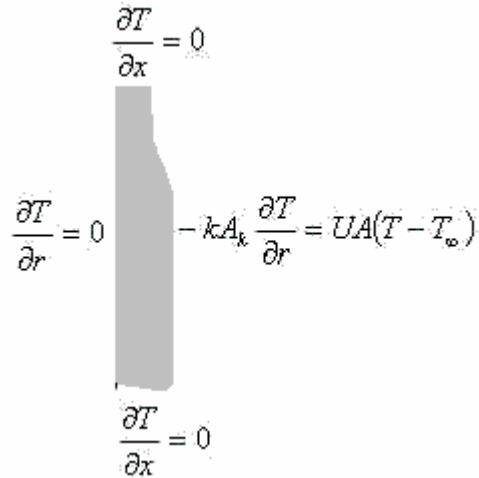


Fig. 2. Condiciones de borde térmicas

Tabla 1. U y T_∞ usados en la simulación

Etapa	Intervalo de Tiempo (s)	U (W/m ² K)	T_∞ (K)
1	0 - 250	795	302
2	250 - 460	283	314
3	460 - 630	283	319
4	630 - 1160	293	335
5	1160 - 1430	201	333
6	1430 - 1600	395	321
7	1600 - 1810	295	316
8	1810 - 2060	295	303

Tabla 2. Correlaciones de las propiedades, T en K

Propiedad	Correlación
ρ (Kg/m ³)	$-2.10^{-6} T^4 + 2.2.10^{-3} T^3 - 1.2T^2 + 212,94T - 15707$
μ (Pa s)	$10^{-3} T^4 + 2.10^{-3} T^3 + 8.10^{-8} T^2 + 2.10^{-5} T + 0,0014$
C_p (J/Kg K)	$7.10^{-6} T^4 + 9.2.10^{-3} T^3 + 4,47T^2 - 929,44T - 78521$
K (W/mK)	$2.10^{-9} T^4 - 3.10^{-6} T^3 - 1,4.10^{-3} T^2 - 0,266T + 19,624$
β (1/K)	$-2.10^{-11} T^4 + 2.10^{-8} T^3 - 10^{-5} T^2 + 2,4.10^{-3} T - 0,198$

3 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 dividiendo el dominio 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. 7. El periodo de tiempo total simulado fue de 2060 segundos (34,33 minutos) y el intervalo de tiempo utilizado fue 5 segundos (para un intervalo de tiempo menor o igual a éste la solución se hace independiente del tamaño del intervalo de tiempo). El tiempo de ejecución de la simulación fue de aproximadamente ocho horas, en un ordenador Pentium 450 MHz con 256 Mbytes de memoria RAM. Es importante indicar que para introducir tanto la dependencia con respecto a la temperatura de las propiedades físicas de la cerveza, los coeficientes globales de transferencia de calor variables en el tiempo y la temperatura de corriente libre del agua externa variable en el tiempo, fue necesario programar

dos subrutinas en el lenguaje Digital Visual Fortran versión 5.0, estas rutinas fueron utilizadas por el procesador del software CFX.

4 Resultados.

En las figuras 3 y 4 pueden observarse los perfiles de velocidades y las distribuciones de temperaturas de la cerveza en la etapa de calentamiento y en las figuras 5 y 6 se presenta el comportamiento térmico y fluidodinámico de la cerveza en la etapa de enfriamiento. En la etapa de calentamiento se observa la capa limite hidrodinámica ascendiendo debido a que el fluido en esta zona está más frío que la pared, generando así las fuerzas de empuje ascendentes propias de la convección libre predominante en la dirección vertical. Es por esto y también por el hecho que el fluido externo va en dirección descendente que en estas etapas de calentamiento las temperaturas de la cerveza en zonas elevadas del envase son mayores que en zonas inferiores, como puede observarse en las mismas figuras. También en ellas se aprecia que los cambios de temperatura en la dirección radial son de magnitud inferior que en la dirección axial, lo que indica que el efecto difusivo predomina sobre el convectivo en esta dirección radial. En las etapas de enfriamiento se observa que la capa limite hidrodinámica es descendente debido a que en estos instantes de tiempo el fluido externo tiene una temperatura menor que el fluido interno, generando de esta manera que la pared interna del envase esté mas fría que la cerveza. También se observa en las figuras 5 y 6 una velocidad de disminución de temperatura mayor en zonas inferiores del envase.

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 (zona en donde el fluido está rotando y comienza su descenso) y un núcleo medio ubicado debajo de la región de mezcla donde el fluido está en pleno descenso. 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 prevalecen gradientes de velocidad y temperaturas apreciables perpendiculares a la pared interna de la botella.

En la figura 8 se presenta el comportamiento térmico transitorio de ocho puntos distribuidos en la dirección axial del envase (ver tabla 3). Se puede observar que los puntos ubicados en regiones superiores adquieren valores de temperatura mas elevados que los puntos ubicados en regiones inferiores, lo que trae como consecuencia que estos puntos superiores obtengan mayor acumulación en el tiempo de las Unidades de Pasterización (ver Figura 9).

En la figura 10 se muestra la variación de las unidades

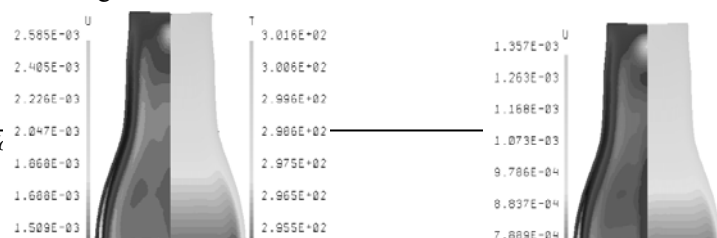




Fig. 6 Distributions en 2060 s

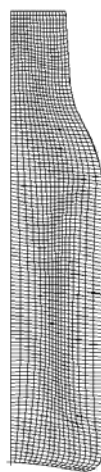


Fig. 7 Mallado del Dominio

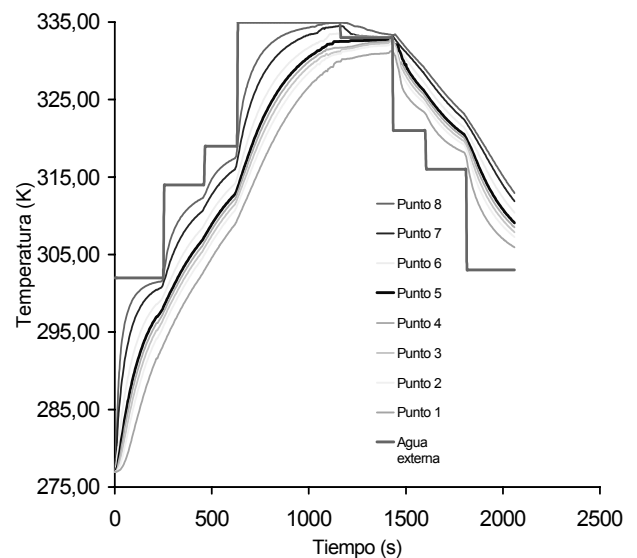


Fig. 8 Perfiles Transitorio de Temperaturas

de pasteurización promedio en función de la posición axial en el envase, y se observa que el centro geométrico del recipiente (punto de monitoreo para las mediciones experimentales de las U.P.), el cual está ubicado en la coordenada axial $x = 6,46$ cm, posee 4,5818 U.P. Este valor dista en aproximadamente 10 % del valor de las Unidades de Pasteurización calculadas en base a todos los puntos del dominio (5,1078 U.P.).

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 de sección transversal variable y el sentido del flujo externo es descendente. De acuerdo al cálculo de las Unidades de Pasteurización realizados a través de la Ec.1 y a lo expresado anteriormente se afirma 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

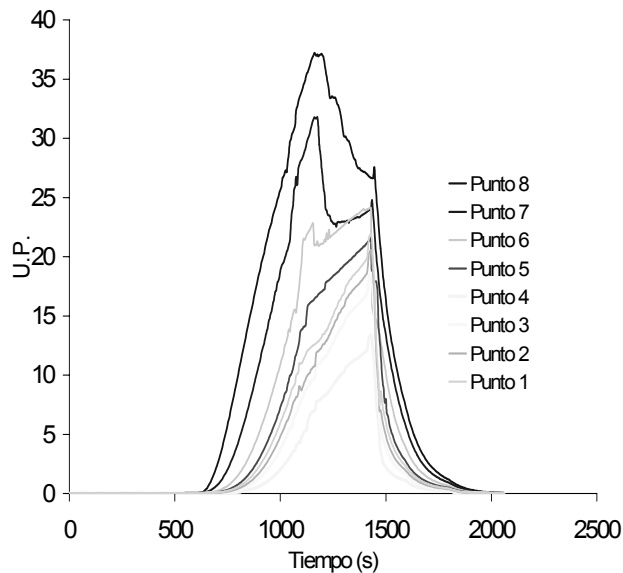


Fig. 9 Unidades de Pasteurización Transitorias

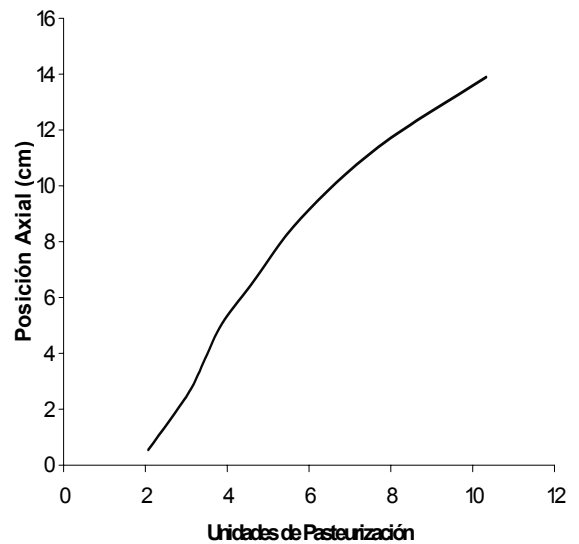


Fig. 10 Unidades de Pasteurización Promedio

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).

Tabla 3. Ubicación a partir del fondo del envase

Punto	Posición (cm)
1	0,545
2	2,55
3	3,81
4	5,07
5	6,46
6	8,85
7	11,4
8	13,9

4 Conclusiones.

Se ha realizado un análisis de la fluidodinámica y la transferencia de energía térmica 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.

Tanto en la etapa de calentamiento como en la de enfriamiento la transferencia de calor en la cerveza es predominante en la dirección axial, presentando amplios gradientes de temperaturas en esta dirección y observando que solo 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 enfrían con mayor velocidad.

Las Unidades de Pasteurización calculadas a través de la temperatura en el centro geométrico arrojan resultados distintos (aproximadamente del 10 %) 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.

Referencias

- 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.
- Brandon, H., Pelton, P., Staack, G. 1982. "State of the art Methodology for evaluation of pasteurizer Heating and cooling Processes". MBAA. Technical Quarterly. Vol. 19, pp. 34-40.
- Brandon, H., Staack, G., Gardner, R., Huling, J. 1984. "Time dependent Modeling of in-Package Pasteurization". MBAA. Technical Quarterly. Vol. 21, pp. 153-159.
- Maliska, C. 1995. "Transferencia de Calor e Mecánica dos Fluidos Computacional". LTC Editora, Brazil.
- 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.

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

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.

Reyes, M., Romero A., Siu, 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.

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.

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