

ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y AHORRO ENERGÉTICO CON EL ENFRIAMIENTO MEDIANTE TEMPERATURAS CONSTANTES Y VARIABLES EN UN TANQUE DE FERMENTACIÓN CILINDRO-CÓNICO PARA LA INDUSTRIA CERVECERA

LIVIO DE SANCTIS

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción general sobre fermentación, fermentadores de fondo cónico y el propósito de la tesis

La fermentación es el proceso central de la producción de cualquier bebida alcohólica y, por tanto, también de la cerveza. Es una fase muy importante, no sólo de cara al producto acabado, sino también en cuanto a la inversión necesaria para crear el sistema más adecuado.

Como es bien sabido, la fermentación de la cerveza, que es el sujeto de los experimentos de esta tesis, se divide en dos partes: la llamada fermentación "primaria" y la fermentación llamada "secundaria" también conocida como maduración o guarda. En las cervezas de baja fermentación (tipo *lager*), para las cuales se cree que las investigaciones descritas a continuación pueden resultar de más interés, la fermentación primaria tiene lugar a unas temperaturas de +10°C aproximadamente y la secundaria a temperaturas que decrecen progresivamente hasta 0°C / - 1°C. La fermentación primaria suele durar 7 días, mientras que la secundaria dura desde varias semanas hasta varios meses.

En el pasado, solían emplearse principalmente depósitos abiertos para la fermentación primaria porque la fermentación tenía lugar a una presión atmosférica y sin recuperación de CO₂; mientras que para la fermentación secundaria, a una presión de 0,5 bar aproximadamente, debían emplearse depósitos cerrados. Mientras que en las fábricas de cerveza de "última generación", la forma de los depósitos empleados para la fermentación suele ser idéntica y, en su mayoría, las fábricas cerveceras emplean depósitos cilindro-cónicos, no sólo para la fermentación primaria, sino también para la secundaria. A menudo, se colocan en el exterior y fueron introducidos por primera vez por el suizo Nathan Leopold en 1910, aunque se empezaron a utilizar en las fábricas de cerveza de todo el mundo a partir de 1969. (Zingg. 1975).

Para obtener un producto final de calidad excelente y constante, es esencial que los técnicos realicen un cuidadoso mantenimiento y elijan una temperatura constante, durante la fermentación primaria y también en la secundaria. La refrigeración de los fermentadores se puede realizar con espacios de aire donde un gas refrigerante se evapora o bien se hace circular una solución refrigerante, normalmente hidro-glicólica: la elección se basa únicamente en los costes: los resultados en térmi-

nos de capacidad del sistema para mantener las temperaturas deseadas son idénticos, mientras que la inversión inicial es mucho más elevada en el caso de los depósitos enfriados por evaporación directa de un gas refrigerante lo que, no obstante, permitirá unos costes operativos más bajos debido a la mayor temperatura de evaporación del gas (porque la refrigeración de la solución glicólica intermedia se "evita", así como también las pérdidas causadas por las bombas de circulación para el glicol) (Pomini, L). En esta tesis, sólo se tendrá en cuenta la refrigeración con solución hidro-glicólica, en primer lugar, porque es la de uso más extendido en las fábricas de cerveza (Zangrando T., comunicación privada, octubre de 2006) y, en segundo lugar, porque la construcción de depósitos enfriados con gas refrigerante no podía llevarse a cabo usando el material transparente necesario para ver los movimientos convectivos.

La literatura sobre los problemas asociados a una refrigeración efectiva de la cerveza, tanto en la fermentación primaria como en la secundaria, es muy extensa y puede considerarse un tema todo menos agotado. (Schuch, 1996). En particular, los fenómenos convectivos, que condujeron a diferencias en la temperatura dentro del mismo depósito y que se consideran indeseables porque tienen un efecto negativo sobre la calidad del producto final, no se han aclarado debidamente. Además, hasta ahora, la influencia de la eficacia de la temperatura del líquido refrigerante sobre la refrigeración de la cerveza y sobre la uniformidad de las temperaturas en el interior de los depósitos todavía no se ha estudiado: tal y como se analizará en el capítulo 4... Realizando los experimentos descritos a continuación, se descubrió que, en realidad, es posible obtener una mayor uniformidad de la temperatura en todos los puntos del fermentador, reduciendo la temperatura del fluido refrigerante hasta aquella de la cerveza que se desea enfriar.

1.2 Proceso productivo de la cerveza

El proceso productivo de la cerveza es bastante complejo, pero se puede resumir tal y como se indica en la **Figura 1.1.**

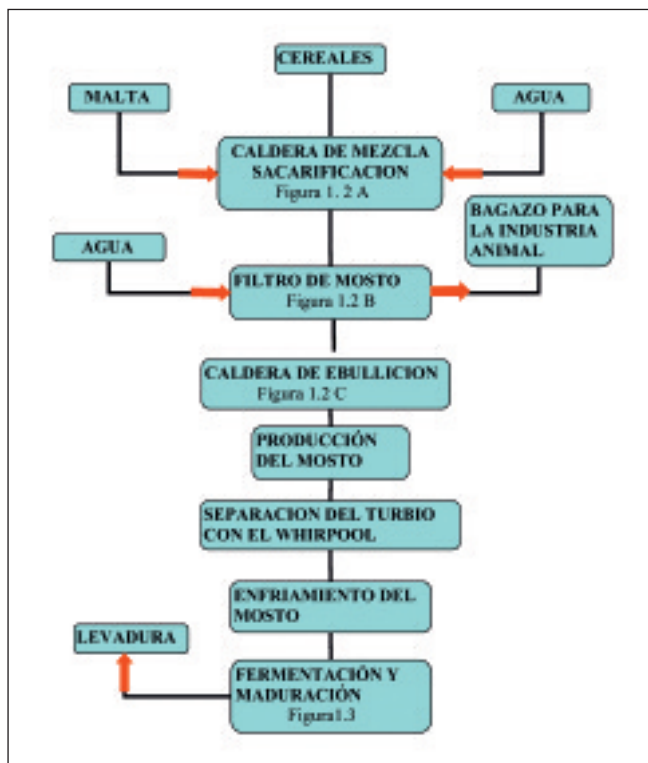


Figura 1.1. Proceso productivo de la cerveza.



Figura 1.2. Sala de cocción de una fábrica de cerveza (caldera de mezcla A, caldera de filtración B, caldera de ebullición C) (cortesía de VELO SpA, Altivole, Italia).



Figura 1.3. Tanques Cilindro-cónicos de fermentación (cortesía de VELO S.p.A, Altivole, Italia).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Arquitectura del sistema

Se llevaron a cabo ensayos con un modelo fabricado en plexiglás, prestando gran atención a su implementación a fin de reflejar con precisión las características de los fermentadores industriales realizados por los diseños 3D y 2D en Catia V5R17; en el ensayo se emplearon ambos modelos, con y sin la forma cónica. Elementos clave en los fermentadores para cerveza son las proporciones correctas entre el diámetro y la altura de la parte cilíndrica. Esta relación diámetro-altura y la forma del depósito influyen en la formación de ésteres (sustancias aromáticas descritas como florales), por lo que, en depósitos cilindro-cónicos muy altos, con una relación altura-diámetro igual o superior a 3:1, la presión hidrostática ejercida por la columna de líquido es más alta que la misma presión ejercida en depósitos con un cociente de 2:1 (o inferior a 2) y el incremento en la presión incrementa la concentración de CO_2 intracelular y conduce a la reducción de la formación de ésteres. La relación elegida fue, por tanto, 2:1, considerada óptima para la producción de cervezas de baja fermentación (tipo lager). Debería advertirse que, en la relación entre diámetro y altura, no se tuvieron en cuenta ni el cono ni el espacio vacío encima del líquido: esta altura debería permitir que sobre el líquido existiese una zona libre igual al 20 – 25% del volumen total del depósito (incluyendo el cono) para garantizar que se pueda formar espuma, sin dejar rastro de ella en el circuito de recuperación de CO_2 . A continuación, aplicamos un cono de Plexiglás con un ángulo de 60° , el cual, en fermentadores reales, tiene la tarea de recoger la levadura en la última fase de la fermentación primaria (Narziss, 1980).

Para permitir la grabación con cámaras, la camisa de refrigeración se realizó en Plexiglás, con una entrada y una salida de $\frac{1}{2}$ "", ubicadas respectivamente en la parte superior e inferior, para tener una entrada por la parte inferior y una salida por la parte superior para el glicol.

2.1.1 Modelo cilindro-cónico en 2D y 3D

La Figura 2.1 muestra las dimensiones lateral, frontal y transversal del modelo cilindro-cónico, mientras que la Figura 2.3 muestra las mismas vistas del modelo cilíndrico.

El modelo cilindro-cónico posee un diámetro interior de 154 mm, un diámetro exterior de 160 mm y una altura de 400 mm, excluyendo el cono, con un ángulo vertical de 60° . El cilindro exterior, que es la camisa de refrigeración, posee un diámetro interno de 184 mm y un diámetro exterior de 200 mm (Figura 2.1) y una altura total de 460 mm. Como se puede ver en las Figuras 2.1 y 2.4, los sensores de temperatura en el modelo cilindro-cónico han sido numerados de acuerdo con los criterios siguientes: aquellos situados a lo largo de la pared se han marcado con las letras W, mientras que los situados a lo largo del eje se han marcado con la letra M.

En el interior del modelo, las temperaturas se tomaron en 6 puntos diferentes, visibles en las Figuras 2.1 y 2.2; los 3 sensores W1, W2, W3 se posicionaron a una distancia de 5 mm del borde del modelo cilindro-cónico y se utilizaron para medir la temperatura en el límite de capa, posicionados respectivamente a una distancia de la base del cilindro de refrigeración de 120 mm, 150 mm y 266 mm (Figura 2.1).

Los 3 sensores M1, M2, M3 se posicionaron a lo largo del eje del modelo, a una distancia de la base del cilindro de refrigeración, al igual que los sensores W1, W2, W3 situados en la pared, y se emplearon para medir la distribución de la temperatura en el centro del cilindro-cónico. El nivel de agua en el modelo era de 10 mm por encima de los últimos sensores W3 y M3.

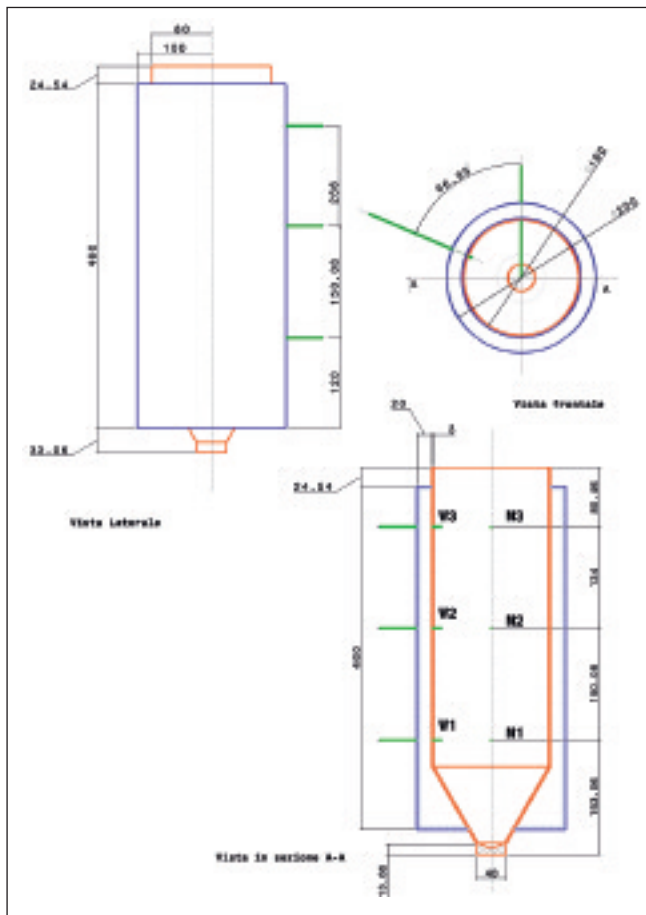


Figura 2.1. Dimensiones y sección del modelo cilindro-cónico en 2D.

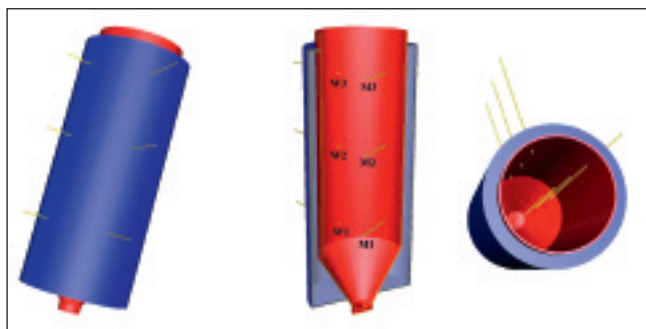


Figura 2.2. Imágenes en 3D del modelo cilindro-cónico.

2.1.2 Modelo cilíndrico en 2D y 3D

Se realizaron las pruebas siguientes en un modelo cilíndrico sin un cono, pero con las mismas dimensiones. Estas pruebas hicieron posible evaluar la influencia del cono sobre la formación de los anillos convectivos y sobre la distribución de la temperatura dentro del modelo. La Figura 2.3 muestra el tamaño y las secciones en 2D, mientras que la Figura 2.4 muestra las imágenes en 3D y la sección. También para el modelo cilíndrico, las temperaturas se tomaron en 6 puntos diferentes, visibles en las Figuras 2.3 y 2.4; los 3 sensores W'1, W'2, W'3 se posicionaron a una distancia de 5 mm del borde del modelo cilíndrico y se utilizaron para medir la temperatura en el límite de capa, posicionados respectivamente, a una distancia de la base del cilindro de refrigeración de 120 mm, 150 mm y 266 mm. (Figura 2.3).

Los sensores M'1, M'2, M'3 se posicionaron a lo largo del eje del modelo, a una distancia de la base del cilindro de refrigeración,

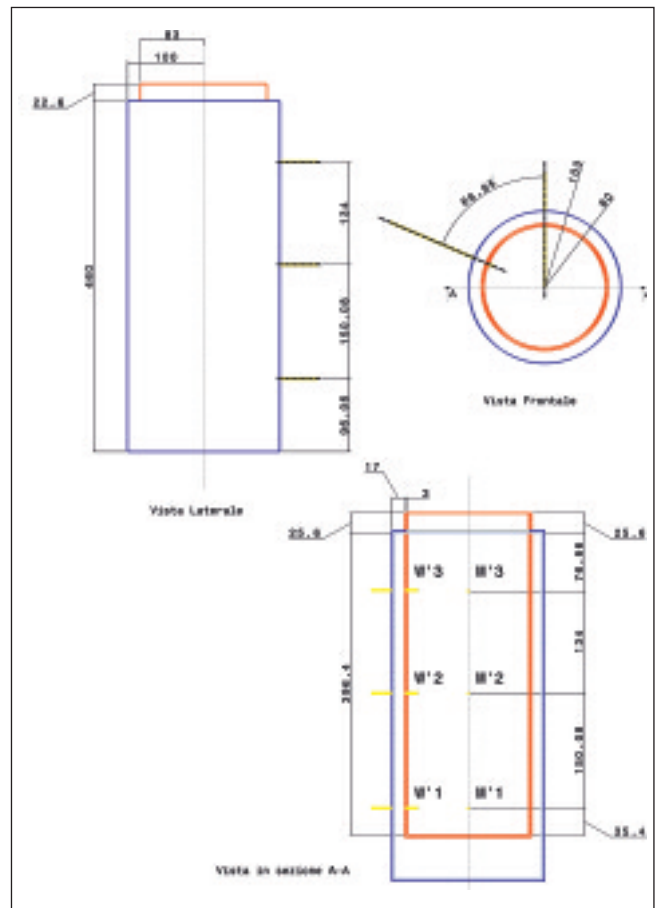


Figura 2.3. Dimensiones y sección del modelo cilíndrico en 2D.

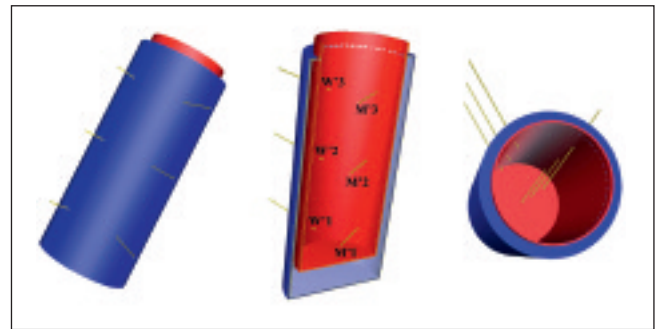


Figura 2.4. Imágenes en 3D del modelo cilíndrico.

al igual que los sensores W'1, W'2, W'3 situados en la pared, y se emplearon para medir la distribución de la temperatura en el centro del modelo cilíndrico. También en esta prueba, el nivel de agua se situó 10 mm por encima de los últimos sensores W'3 y M'3.

2.1.3 Diagrama del sistema de refrigeración a una temperatura constante de -4°C

El sistema de refrigeración a una temperatura constante de -4°C, tal y como se puede ver en la Figura 2.5, consta de un sistema refrigerador de HUBER CC415 con un acumulador de glicol frío, una válvula automática para regular el caudal y, para la toma de datos, de 4 sensores de temperatura externos, ubicados respectivamente en el acumulador del sistema de refrigeración, en la entrada de la camisa de refrigeración, en el fermentador y en la salida de la camisa de refrigeración. Seguidamente, se incorporó un caudalímetro en el paso siguiente a la válvula de regulación.

La parte hidráulica se realizó íntegramente en tubos de 1/2" de PVC aislado, suministrados por el fabricante de la máquina de refrigeración; estos tubos se equiparon con conexiones rápidas de latón. El tramo de PVC que conecta la máquina de refrigeración al modelo media aproximadamente 1.200 mm.

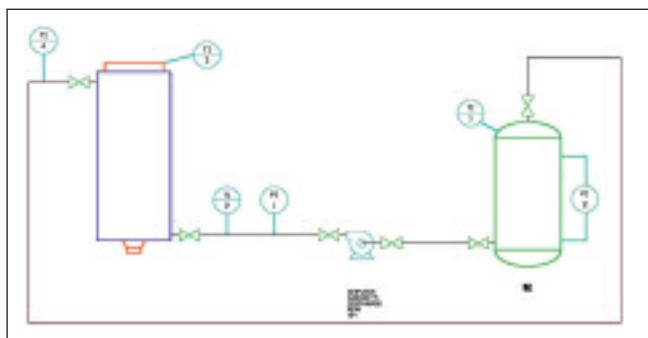


Figura 2.5. Diagrama en 2D del circuito del sistema de refrigeración a una temperatura constante.

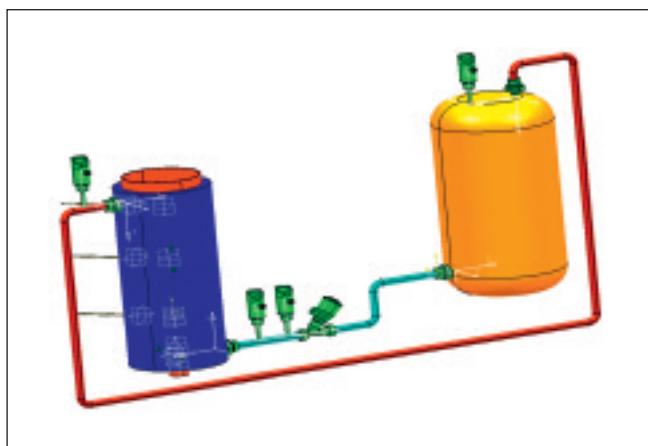


Figura 2.6. Diagrama en 3D del circuito del sistema de refrigeración a una temperatura constante.

2.1.4 Diagrama del sistema de refrigeración con una temperatura variable

El sistema de refrigeración con una temperatura variable se constituyó con el mismo sistema de refrigeración UBER CC415 que el modelo con refrigeración a temperatura constante pero, para permitir el mezclado, se incorporaron una válvula de mezclado de 3 vías controlada electrónicamente,

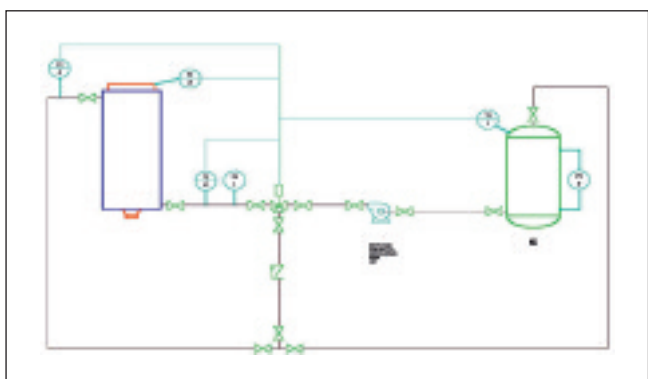


Figura 2.7. Diagrama en 2D del circuito del sistema de refrigeración con una temperatura variable.

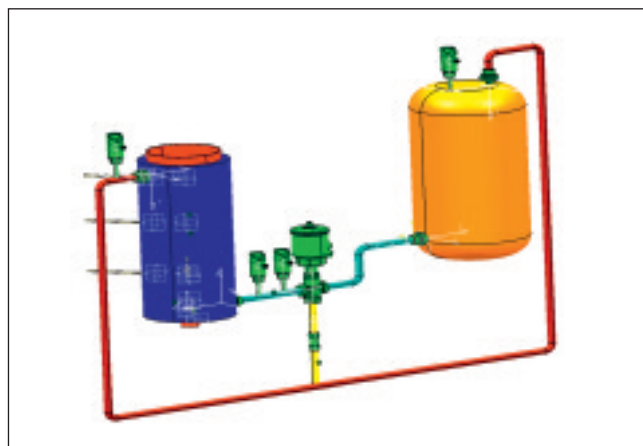


Figura 2.8. Diagrama en 3D del circuito del sistema de refrigeración con una temperatura variable.

una válvula de comprobación situada en el circuito de intercepción del refrigerante de glicol caliente en la salida de la camisa de refrigeración, 3 sensores de temperatura y un caudalímetro. Los sensores de temperatura se situaron en el acumulador de glicol, en la entrada de la camisa de refrigeración y, a su salida, en el fermentador. La temperatura del glicol entrante en la camisa de refrigeración (temperatura de mezclado) se asoció a la temperatura interna del fermentador, a la temperatura del glicol saliente del frigorífico y a la temperatura saliente de la camisa de refrigeración.

2.2 Refrigeración

2.2.1 Máquina de refrigeración

Se prestó mucha atención a la elección y al ajuste del sistema de refrigeración a fin de alcanzar una temperatura de -4°C lo más constante posible en ambos sistemas de refrigeración, con una variación máxima de 0,5°C, aunque en las pruebas se obtuvo una variación máxima de 0,07°C. Esta elevada precisión resultó esencial para disponer, para la planta de refrigeración a temperatura constante, de una medición precisa de las distribuciones de las temperaturas internas en el fermentador y, en el sistema de refrigeración variable, de una temperatura precisa del glicol.

La máquina de refrigeración empleada fue una HUBER CC415 (**Figura 2.9**) con alta precisión y con las características siguientes:



Figura 2.9. Máquina de refrigeración Huber CC415.

Rango de funcionamiento: -40/+200°C
 Volumen de glicol: 5 l
 Capacidad de refrigeración a 0°C: 1 Kw.

2.2.2 Líquido refrigerante

El líquido refrigerante empleado fue el propilenglicol al 25%, lo que nos permitió reducir el punto de congelación del agua a -9°C. Este tipo de glicol se utiliza mucho en la industria alimentaria y farmacéutica porque posee un nivel de toxicidad y contaminación mínimo. (Giessen, 2007); en la **Tabla 2.1**, se puede ver la variación en la temperatura de congelación respecto a la variación del porcentaje en peso y volumen del propilenglicol.

Viscosidad del propilenglicol: 18 cp a un rango de temperatura de -5°C -3°C.

Coefficiente de transmisión térmica: 1.900 W/ m² / °C.

% Peso Propilenglicol	% Volumen Propilenglicol	Punto de congelación (°C)	°Brix
0	0	0.0	0
20	19.4	-7.1	15.4
25	24.4	-9.6	19
30	29.4	-12.7	22
31	30.4	-13.4	22.7
32	31.4	-14.1	23.6
33	32.4	-14.8	24.4
34	33.4	-15.6	25.3
35	34.4	-16.5	26.1
36	35.4	-17.3	26.9
37	36.4	-18.2	27.5
38	37.4	-19.1	28
39	38.4	-20.1	28.5
40	39.4	-21.1	29.1
45	44.4	-26.7	31.8
50	49.4	-33.5	34.7

Tabla 2.1. % de propilenglicol y punto de congelación (Giessen, 2007).

2.2.3 Sistema de regulación de la temperatura y del mezclado

El sistema de refrigeración y mezclado se consiguió en Labview 8.2, prefiriéndose una regulación PID (**Figura 2.10**), en comparación con un regulador normal ON-OFF, puesto que este último tiene la desventaja de ser capaz de actuar únicamente con dos posibilidades a la hora de controlar el sistema, es decir, una desconexión total de la energía o una aplicación de toda la energía, con lo que somete al activador eléctrico de la válvula de mezclado a una gran sobrecarga.

El PID proporciona al sistema varias opciones de potencia, por ejemplo, 25% ó 70%, etc., por lo que existen más posibilidades de controlar la energía suministrada al sistema.

Las ventajas de una regulación PID se pueden resumir en:

1. Excelente eficacia en la regulación de muchas aplicaciones.
2. Simplicidad en la calibración.
3. Buena rentabilidad.
4. Un mayor rango de regulación de la potencia.

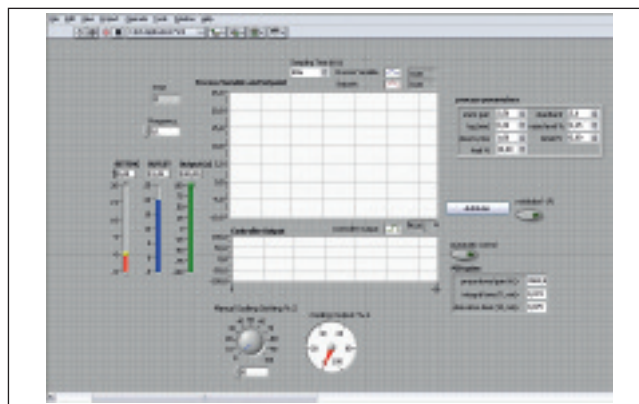


Figura 2.10. Imagen en Labview 8.2 de la regulación de la temperatura mediante el sistema PID.

2.3 Adquisición de datos

2.3.1 Adquisición de las temperaturas

Se tomaron las temperaturas de las pruebas realizadas con ambos sistemas de refrigeración mediante 9 sensores de temperatura, 6 situados en el interior del modelo, tal y como aparecen en las **Figuras 2.2 y 2.3**, 2 sensores situados respectivamente en la entrada y la salida del glicol en la camisa de refrigeración y el último sensor empleado para tomar la temperatura del glicol en la máquina de refrigeración.

El control y el registro de las temperaturas se gestionó mediante un programa independiente realizado en el Labview 8.2 y los mismos datos se obtuvieron simultáneamente desde un Datalog text 454 para comparar los datos finales y minimizar así los errores. En el programa Labview (**Figura 2.11**), podemos ver las pantallas 1, 2, 3 referidas, respectivamente, a los sensores W3, W2, W1, situados en el borde del modelo, las pantallas 6, 7, 8 de los sensores M1, M2, M3 situados en el eje, y las pantallas 4 y 5 de los sensores respectivos de entrada y salida de la camisa de refrigeración; en las pantallas A y B hemos representado gráficamente y de forma simultánea las fluctuaciones en las temperaturas en los sensores W3, W2, W1 y M1, M2, M3, respectivamente; en la pantalla C, el formato de destino de los datos registrados se estableció como Excel.

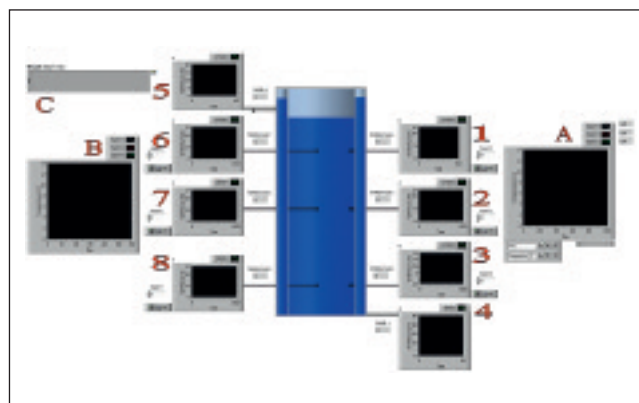


Figura 2.11. Imagen en Labview 8.2 de la toma de las temperaturas.

2.3.2 Toma de imágenes VIS

Las tomas de las imágenes VIS laterales para el estudio de los movimientos convectivos en el interior de los modelos se realizaron con una videocámara en color Firewire DFK 21AF04 de IMAGINGSOURCE (Figura 2.15), ubicada a una distancia de 1.800 mm del modelo, a 1.500 mm del suelo con un ángulo de aproximadamente 45° (Figura 2.13); la cámara se conectó mediante un cable USB a una interfaz PC card CBI/139401 y ésta a su vez al ordenador (Figura 2.14); las tomas y los ajus-

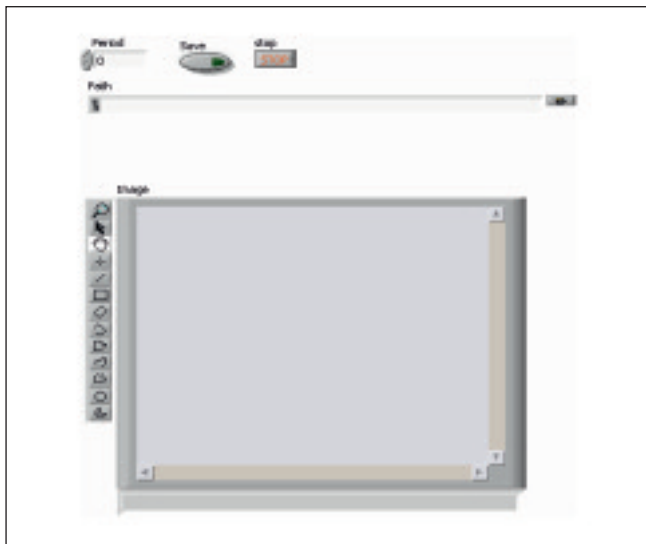


Figura 2.12. Imágenes Labview del sistema de adquisición de imágenes.

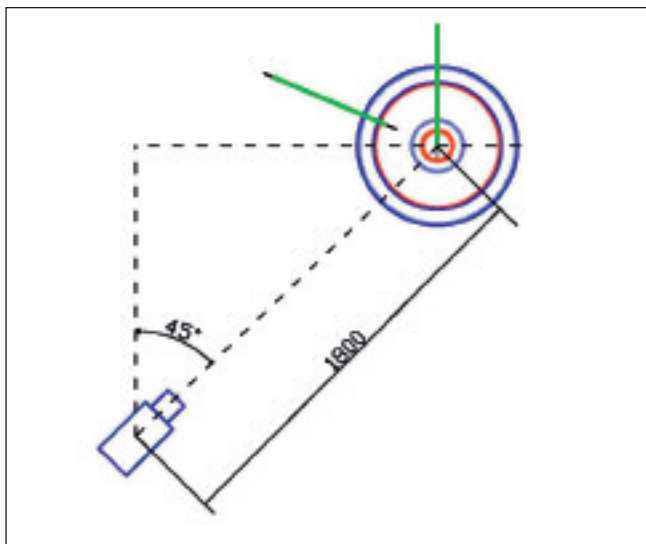


Figura 2.13. Posición de la cámara.



Figura 2.14. Interfaz CBI/139401.

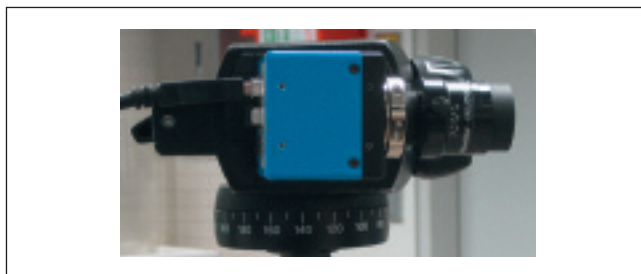


Figura 2.15. Cámara DFK 21AF04.

tes de imagen se realizaron con un programa elaborado especialmente en Labview 8.0 Visio (Figura 2.12).

2.3.3 Toma de imágenes de IR

Las imágenes de la superficie del modelo y de IR se realizaron con la cámara FLIR P25 HS (Figura 2.16), con una cámara de vídeo normal VIS y una cámara de IR con sensibilidad térmica @ 50/60 Hz de 0,08°C y un rango espectral de 7,5 a 13 μ m. A continuación, las imágenes guardadas en formato JPEG se procesaron con el software ThermoCAM QuickReporter 1.0, incluido con la cámara térmica. El rango operativo de las pruebas fue de 15°C a -5°C, y una temperatura ambiente constante de 20°C, constante puesto que las pruebas se realizaron en un Laboratorio de Climatología (Labor Heizung, Lüftung, Klima). La cámara se colocó sobre un trípode y la lente se situó a 600 mm de la superficie del agua (Figura 2.17) en el modelo cilindro-cónico. Se tomaron las imágenes VIS e IR a intervalos regulares de 10 segundos.

2.3.4 Carta de datos

El visionado de los movimientos convectivos en el interior del modelo se realizó mediante el uso de tinta, inyectada en una



Figura 2.16. Cámara IR FLIR P25 HS.

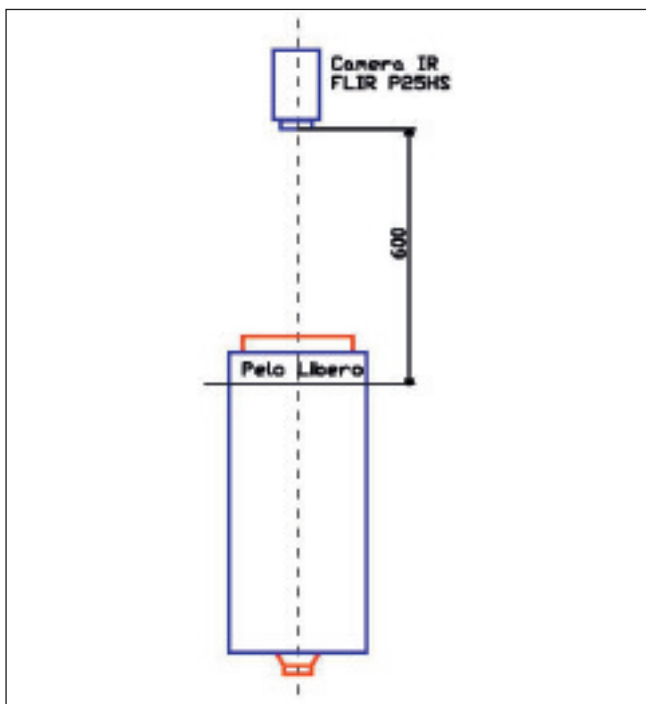


Figura 2.17. Posición de la cámara.

posición perpendicular respecto al eje de la cámara de color DFK 21AF04, con una cantidad de 150 μl aproximadamente cada 10 minutos desde el inicio del enfriamiento hasta que la temperatura alcanzó los $+4^{\circ}\text{C}$, temperatura a la cual se empezaron a formar los anillos convectivos ascendentes.

2.4 Software empleado

En este estudio, se emplearon diferentes tipos de software para cubrir las diferentes necesidades de simulación, diseño y cálculo, respectivamente:

Labview 8.2 para la adquisición de las temperaturas e imágenes

Fluent 6.3.26 para simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics)

Ansys Icem Cfd para la malla

Catia V5R17 para el diseño en 2D y 3D del modelo y el diseño 3D del sistema de refrigeración.

Autocad 2005 y Cadwork P&ID para la disposición del sistema de refrigeración.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Densidad y temperatura del agua

Se realizaron pruebas con agua porque está presente en la cerveza en un porcentaje comprendido entre el 91% y el 97%; en consecuencia, los resultados se pueden aplicar al sistema de las fábricas de cerveza industriales salvo por una diferencia: la temperatura de la densidad máxima del agua es $+4^{\circ}\text{C}$, mientras que en el caso de la cerveza oscila (dependiendo del contenido en alcohol) entre el $+1^{\circ}\text{C}$ y el $+2,5^{\circ}\text{C}$. (Briggs, 2004)

Una de las características del agua, que han influido sobremanera en el estudio de los movimientos convectivos en las pruebas, es la densidad anómala del agua a una temperatura cambiante. Recordemos la fórmula:

$$\rho = P / V$$

en general, si el volumen de la sustancia se reduce y el peso sigue siendo el mismo, significa que la densidad se ha incrementado. Por su parte, el agua presenta un comportamiento anómalo, cuando la temperatura del agua se incrementa por encima de $+4^{\circ}\text{C}$, la densidad se reduce. En el intervalo comprendido entre los 0°C y los 4°C , cuando la temperatura se incrementa, la densidad se incrementa, en lugar de decrecer. El agua alcanza su densidad máxima hasta aproximadamente los $+4^{\circ}\text{C}$, donde su valor ronda los 1.000 Kg. /m^3 , mientras que al resto de temperaturas su densidad es inferior. Este comportamiento anormal del agua se puede atribuir a su estructura compleja, caracterizada por grandes espacios intramoleculares. A una temperatura superior a los 0°C , el agua sigue en estado líquido, pero algunas de las moléculas ya se han agregado a cristales microscópicos gracias a las potentes interacciones entre los aditivos (puentes H) que se generan entre los dipolos positivos ($\delta +$) en relación con los átomos H de las moléculas de agua y los dipolos negativos ($\delta -$) en relación con los átomos O del resto de las moléculas de agua: éstos son los cristales que aportan al agua fría un volumen excesivo y, por tanto, una menor densidad. (Martyntenko, 2005)

Esta característica está vinculada a la polaridad de la molécula, debida a su vez a la polaridad del enlace covalente y a la orientación de los átomos unos respecto a otros, determinando la formación de dipolos muy marcados.

Así, las moléculas de agua en la malla cristalina de hielo (bipiramidal hexagonal) se disponen para dejar espacios vacíos y, de este modo, en un volumen de agua hay más moléculas que en el mismo volumen de hielo.

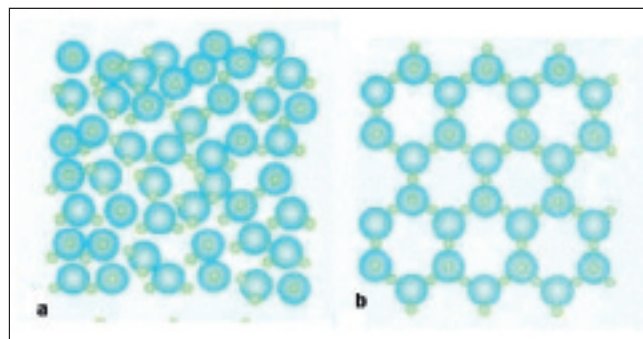


Figura 3.1. Moléculas de agua a. Moléculas de hielo b.

La variación en la densidad del agua por efecto de la temperatura se expresa por una función polinómica de cuarto grado estudiada por Kohlrausch (1968) con un error del 0,02%.

$$\rho = 999.840281167108 + 0.0673268037314653 \times t - 0.00894484552601798 \times t^2 + 8.78462866500416 \times 10^{-5} \times t^3 - 6.62139792627547 \times 10^{-7} \times t^4$$

donde 999.840281167108 es la densidad del agua a 0°C . (Kowalewski, 1999).

Tomando como referencia el rango de temperatura comprendido entre los -2°C y los $+12,5^{\circ}\text{C}$, usado en las pruebas, podemos elaborar gráficas y gráficos para expresar los valores de la densidad en relación con la temperatura, aplicando la función de Kohlrausch.