



Control automático con lógica difusa de la producción de cerveza artesanal en las etapas de maceración y cocción

Automatic control with fuzzy logic of home-made beer production in maceration and cooking stages

Mariano Luján Corro¹, Víctor Vásquez Villalobos^{2,*}

¹ Universidad de Padua, Vía Ugo Bassi 1, 35131, Padova, Italia.

² Departamento de Ciencias Agroindustriales, Univ. Nac. de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n. Ciudad Universitaria. Trujillo, Perú.

Recibido 11 Mayo 2010; aceptado 21 Junio 2010

Resumen

Se controló automáticamente con lógica difusa, el proceso de producción de cerveza artesanal en las etapas maceración y cocción de la malta; a través de diferentes actuadores y en función del tiempo y temperatura del proceso, utilizándose LabVIEW 2009. El equipo estuvo constituido principalmente de tres recipientes de acero inoxidable de 20 L de capacidad (dosificación de agua, maceración y cocción), un recipiente adicional para el lúpulo, una tarjeta de adquisición de datos (con micro controlador PIC 16F877a), tres sensores de temperatura LM35 y 11 actuadores de tipo on/off, los cuales fueron gobernados por un total de 47 reglas difusas tipo Mandani, con funciones de membresía trapezoidales, empleando para la defusificación el método del centro de área. Se controló adecuadamente en sus etapas de maceración y cocción, los actuadores: electroválvulas (5), bombas (2), calefactores (3) y un agitador; empleando un tiempo aproximado de 4 horas. La cerveza obtenida mediante el control automático con lógica difusa en las etapas de maceración y cocción, tuvo las siguientes características: densidad de 0.98 g/cm³; pH de 3.9; acidez total expresada como ácido láctico de 0.87%, grado alcohólico de 6.2 °GL y porcentaje de CO₂ de 0.91% p/v.

Palabras clave: Control automático, lógica difusa, cerveza artesanal, maceración, cocción de malta.

Abstract

The process of home-made beer production in the malt maceration and cooking stages was controlled automatically with fuzzy logic, across different performers considering the time and temperature of the process, using 2009LabVIEW. The equipment was mainly composed of three 20 L capacity stainless steel containers (water supply, maceration and cooking), an additional hops container, a data acquisition card (PIC 16F877a micro controller), three LM35 temperature sensors and 11 on/off type performers, which were governed by a total of 47 Mandani type fuzzy rules with trapezoidal membership functions, using the method of center area for the defuzzification. The performers: electrovalves (5), pumps (2), heaters (3) and a stirrer, in approximately 4 hours, were adequately controlled in their early maceration and cooking stages. The beer obtained by automatic control with fuzzy logic in the maceration and cooking stages, had the following characteristics: 0.98 g/cm³ of density, 3.9 of pH, total acidity expressed as 0.87% of lactic acid, 6.2°GL of alcoholic degree and 0.91% w/v of CO₂ percentage.

Keywords: automatic control, fuzzy logic, home-made beer, maceration, cooking malt.

1. Introducción

En los últimos años se reporta un incremento de la industria cervecera artesanal, debido

fundamentalmente al aumento de “pubs” y bares que promueven su consumo (Gutiérrez *et al.*, 2002). La cerveza artesanal es un

* Autor para correspondencia

E-mail: vjvv@hotmail.com (V. Vásquez)

producto principalmente a base de cebada, la que posterior a las etapas de malteo, maceración, cocción, fermentación y maduración, permite obtener un producto natural, existiendo la posibilidad de la elaboración de una gran variedad de cervezas.

La preparación de cerveza, implica el entendimiento de una serie de reacciones enzimáticas, microbiológicas, así como el control de ciertos parámetros; lo que hace que el artesano se convierta en un estudioso del proceso, por lo que no debe descuidarse la ejecución de los procedimientos correctos, ya que se podría obtener una cerveza de baja calidad. La producción de cerveza artesanal en el mundo y en el Perú es creciente, por la misma tendencia que las personas buscan consumir productos naturales. Es allí donde las micro y pequeñas empresas (MYPES) entran a tallar, para crear pequeños módulos de producción de cerveza, enfocados al consumo por parte de turistas nacionales y extranjeros, que buscan productos exóticos cuando visitan una determinada ciudad. Las MYPES, vienen mostrando dinamismo sobre la economía de nuestro país, constituyéndose en la base empresarial más importante por la generación de empleo (Huamán, 2009).

Un artesano con pocos conocimientos tecnológicos (sobre reacciones enzimáticas, microbiología, etc.), podría obtener una cerveza casera con características estables de calidad, mediante un control automático y con una inversión relativamente baja; sólo necesitaría una tarjeta de adquisición de datos y un ordenador (computadora). Para la elaboración de cerveza los principales parámetros a tener en cuenta son la temperatura y el tiempo, sin dejar de mencionar que en ello también se debe realizar otras mediciones (pH, densidad, etc.) en el transcurso del proceso. El manejo de temperatura en la elaboración de cerveza, en general, mejora la presencia de componentes volátiles y aromáticos, mejorando el sabor de la cerveza (Martínez, 2002).

En muchos procesos industriales, los métodos convencionales de control automático muchas veces no son lo más adecuados, debido a que estos requieren un conocimiento estricto de la relaciones de entrada y salida del proceso (Universidad Pública de Navarra, 2006). En otros casos, debido a la complejidad de estos, se deben simplificar muchos de los cálculos que describen a los mismos, obteniéndose resultados no del todo satisfactorio, apareciendo controles automáticos de baja calidad y funcionamiento inadecuado (Universidad de Jaén, 2002).

Ante muchas de estas dificultades, los controladores difusos son una alternativa pues proveen de algoritmos que permiten convertir una estrategia de control lingüístico, basada en el conocimiento de la experiencia, en una estrategia de control automático; es decir, un control del proceso mucho más cercano a la forma en que lo haría un operador experto utilizando su experiencia (Cotero, 2003). Su fundamento es la aplicación de la lógica difusa, a la cual Hellman (2011) define como una lógica multivaluada, que muestra valores intermedios en evaluaciones convencionales como verdadero/falso, si/no, alto/bajo, etc.; permitiendo manejar y procesar cierto tipo de información inexacto, impreciso o subjetivo, similar a como lo hace el cerebro humano (Puig, 2008).

El diseño de un controlador difuso no requiere un modelo analítico completo del sistema dinámico. Su diseño es un controlador heurístico basado en el conocimiento o sistemas basados en reglas (Universidad de Jaén, 2002) operando con conjuntos difusos en lugar de números (Sanz, 2001). El control difuso soluciona un problema específico mediante tres pasos: fusificación, inferencia y defusificación (Lira y Tapia, 2007).

En este contexto se ha desarrollado la presente investigación, como parte integrante de un proyecto completo de elaboración de

cerveza artesanal, empleando control difuso de bombas, calefactores y electroválvulas (contactores off-on) en las etapas de maceración y cocción durante la elaboración de cerveza artesanal tipo ale.

2. Materiales y métodos

Se utilizó cebada malteada de seis hileras (*Hordeum vulgare*), lúpulo (*Humulus lupulus*) variedad Nugett (α ácidos 11-12.5%, β ácidos 3.5-4%, humulonas 22-25%, aceites esenciales 2 mL/100 g); agua potable y la cepa de *Saccharomyce cerevisiae* CET 1987. Asimismo tarjeta de adquisición de datos, sensores de temperatura LM35, software LabVIEW 2009 (versión demo), computadora

(Pentium IV), electroválvulas (de solenoide), bombas eléctricas, calefactores (hornillas de 3000 W), agitador, mangueras, vasos de precipitación de 100 y 500 mL, probetas de 500 mL, tres tanques con capacidad de 20 litros, Picnómetro de 5 mL, pHmetro, balanza semianalítica, intercambiador de calor, filtro de cartuchos.

Metodología

Los pasos para la construcción del equipo se muestran en la Figura 1, la cual se realizó a través de una secuencia mecánica-eléctrica y electrónica. El diseño, construcción y ensamblaje del equipo, en primera instancia correspondió a la parte electro-mecánica.

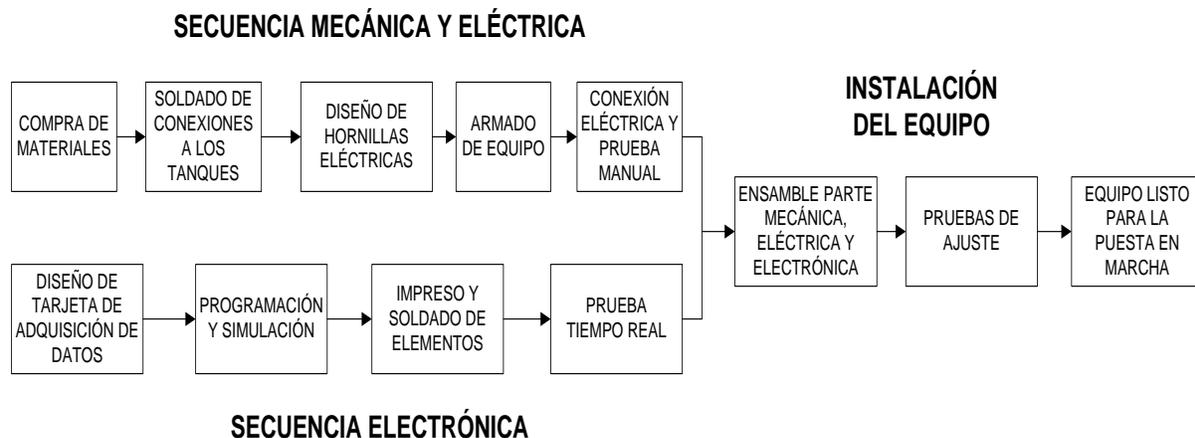


Figura 1. Esquema de construcción y puesta en marcha del equipo.

Producción de cerveza artesanal tipo ale y sus etapas automatizadas

Montado el equipo y realizadas las pruebas de ajuste, se procedió a una producción controlada automáticamente de cuatro lotes de cerveza. Los lotes fueron caracterizados fisicoquímicamente (densidad, acidez total, grado alcohólico y concentración de CO₂).

El diagrama de flujo para la producción de cerveza artesanal tipo ale se muestra en la Figura 2. Las etapas que anteceden a la maceración y las que suceden al enfriamiento se realizaron de forma manual. El control automático se hizo en las etapas de

maceración/pre-filtración (la pre-filtración se hizo a base de cascarillas de malta molturada), cocción (etapa donde se le agregó lúpulo al macerado en dos momentos, uno para fijar el amargor y el otro para el aroma) y la etapa de enfriamiento (mediante un intercambiador de calor, cuya fuente de enfriamiento fue agua potable).

La maceración se realizó en dos diferentes condiciones, la primera a temperatura de 68 - 70 °C por 1 hora y la segunda por 30 minutos a temperatura entre 72-74 °C. Durante la maceración se produce formación de azúcares (55-62.5 °C) en tiempos de 5 a 20 minutos,

formación de dextrinas (67-72.5 °C) en tiempos de 5 y 30 minutos y conversión entre 70-74 °C; la que sirve para completar todas las actividades enzimáticas, con una duración máxima de 30 minutos. La estabilización se realiza a 74-77.5 °C con inactivación total de las enzimas en tiempos de 5 a 10 minutos. Gran parte de las proteínas que se solubilizan en la maceración se retiran por coagulación, en la misma maceración ó durante la ebullición del mosto (Gonzales, 2006). Silva (2006) refiere que en algunos casos es necesario centrifugar el mosto.

En la etapa de cocción se empleó un tiempo de 110 minutos. Fodor (1998) recomienda no excederse de los 75 minutos y Carbajal (2005) recomienda un tiempo de cocción de la mezcla malta-lúpulo de 2 horas con 30 minutos. En la fermentación el porcentaje fermentable de los azúcares simples puede llegar al 100%. Otros compuestos con azúcares más complejos como la malta, no son del todo fermentables, así como las materias proteínicas pueden ocasionar problemas en la fermentación provocando turbidez en la cerveza (Gonzales, 2006).

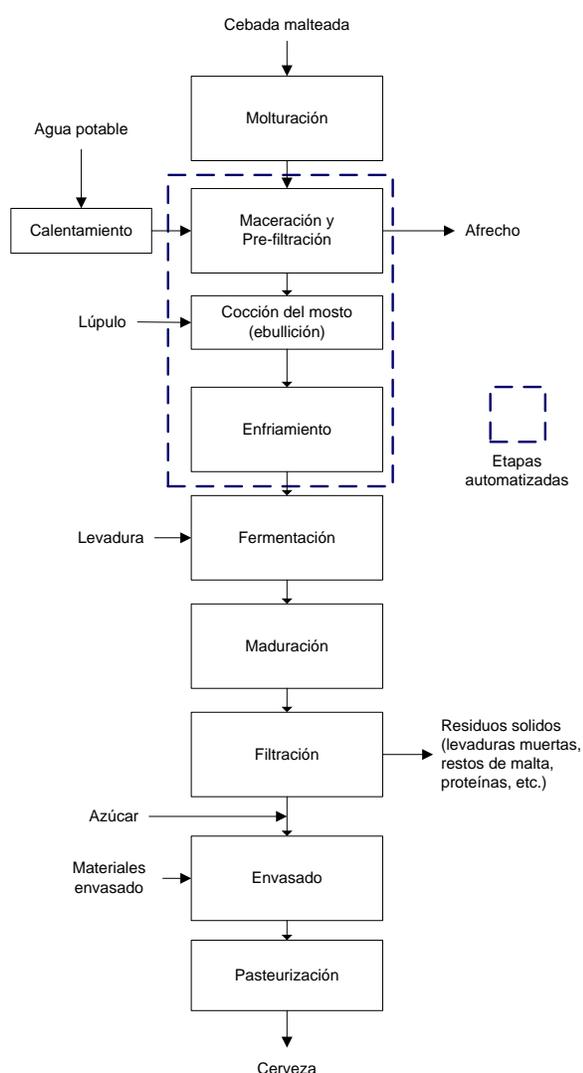


Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención de cerveza tipo ale y ubicación de las etapas automatizadas.

La cerveza obtenida se maduró por una semana a temperaturas de refrigeración entre 3 a 5 °C. En ciertos casos se suele emplear dos etapas reposo y acabado y durante el reposo se hace una segunda fermentación. En el paso de reposo a acabado la temperatura es de 2 a 3°C y en acabado se puede enfriar a -1°C, proceso que puede durar 2 a 3 meses. Los objetivos de la maduración son acumular o almacenar cerveza, dejar sedimentar en forma natural la materia amorfa y la levadura que aún tiene la cerveza, refinación del sabor por eliminación de las sustancias volátiles que causan el sabor verde, separación por precipitación de los compuestos que se forman al ser enfriada la cerveza (Gonzales, 2006).

La pasteurización de la cerveza se realizó a 60 °C por un periodo de 10 minutos, con el fin de inactivar las células vegetativas de microorganismos patógenos. Usualmente, este proceso se realiza en un pasteurizador tipo túnel, durante 10 a 20 minutos a una temperatura de 60°C (Cerna, 2006).

Una vez realizada todas las operaciones, manuales y automáticas, para la producción de cerveza artesanal, se procedió a la determinación de sus propiedades fisicoquímicas: densidad, pH, acidez total (%), grado alcohólico (°GL) y concentración de CO₂.

Procedimiento para la automatización

Los lazos de control para los procesos de dosificación de agua, maceración/pre-filtración y cocción del mosto respectivamente, se muestran en las Figuras 3, 4 y 5. Para activar o desactivar los actuadores correspondientes (bombas, hornillas eléctricas, electroválvulas, y el agitador), se compararon constantemente al valor de temperatura referencial (valor de referencia) (Méndez y Villegas, 2005).

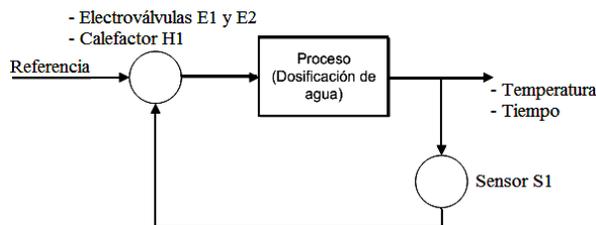


Figura 3. Lazo de control para alcanzar la temperatura del dosificador de agua.

En la etapa de dosificación de agua (Figura 3) los actuadores E1, E2, y H1, se activaron o desactivaron de acuerdo a la temperatura (70-74 °C) y tiempo de proceso (0-10 min). La electroválvula E1 operó en función al tiempo, mientras que la E2 en función a la temperatura (S1) y tiempo y el calefactor H1 en función de la temperatura (S1).

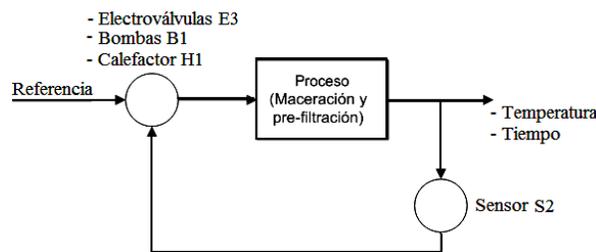


Figura 4. Lazo de control de la temperatura de maceración.

En la etapa de maceración y pre-filtración (Figura 4), la activación de la electroválvula E3 y la bomba B1 se realizó en función al tiempo (0-60 min) y temperatura (66-70 °C) y el calefactor H2 en función de la temperatura (S2).

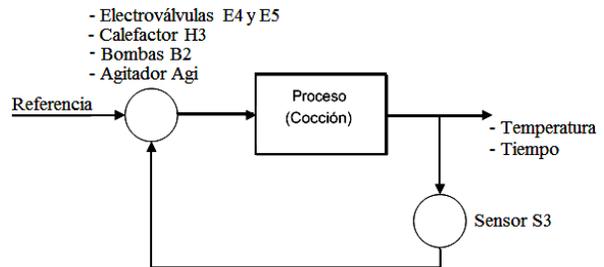


Figura 5. Lazo de control de la temperatura de cocción.

En la etapa de cocción (Figura 5), la electroválvula E4 y el agitador Agi, se activaron en función del tiempo (0-60min) y temperatura (98-105°C), la bomba B2 en función del tiempo y la electroválvula E5 en función del tiempo. Asimismo el calefactor H3 se activó en función de la temperatura (S3).

Generación de funciones de membresía, reglas difusas e inferencia

Esta operación se hizo mediante el Fuzzy System Designer de LabVIEW 2009 (versión demo). Se dividió el proceso en sub-etapas (sub VIs), metodología que facilita la creación del programa principal (National Instruments, 2009), a las que se caracterizó mediante un número de orden y una pequeña descripción: *1LlenAgua.fs*, 1 es el número de operación y lo demás la operación: “llenado de agua al dosificador” y “.fs” corresponde a la extensión del archivo. Para todas las reglas difusas se utilizó la estructura Mandani y para la defusificación el método del centro de área. Como ejemplo de la fusificación, generación de reglas, defusificación y vista gráfica del modelo de la relación entre variables de entrada y salida correspondientes al surtido del agua, hacia el tanque de dosificación y la correspondiente a la etapa de maceración se muestra a continuación:

1LlenAgua.fs

En la Tabla 1 se muestran las variables de entrada (tiempo) y salida (electroválvula Elv1 y calefactor Hor1) al sistema difuso, llenado de agua al tanque dosificador.

Tabla 1

Variables de entrada y salida al sistema difuso (etapa de dosificación)

Nombre	Rango	Número de funciones de membresía
Variables de entrada:		
Tiempo (min)	0 a 5	2
Tiempo (min)	0 a 5	2
Variables de salida:		
Elv1	0 a 10	2
Hor1	0 a 10	2

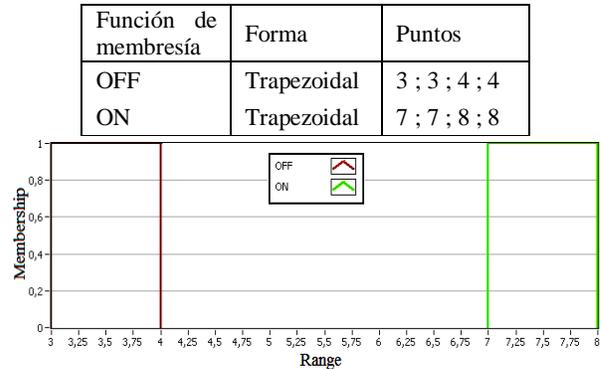


Figura 8. Funciones de membresía de Hor1.

Entrada de las funciones de membresía (membership). En la Figura 6 se muestra las funciones de membresía para las variables de entrada tiempo.

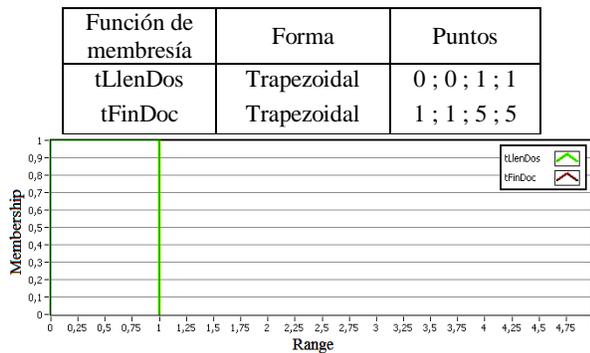


Figura 6. Función de membresía tiempo (min).

Salida de las funciones de membresía. En las Figuras 7 y 8 se muestran las funciones de membresía para las variables de salida: electroválvula Elv1 y para el calefactor Hor1.

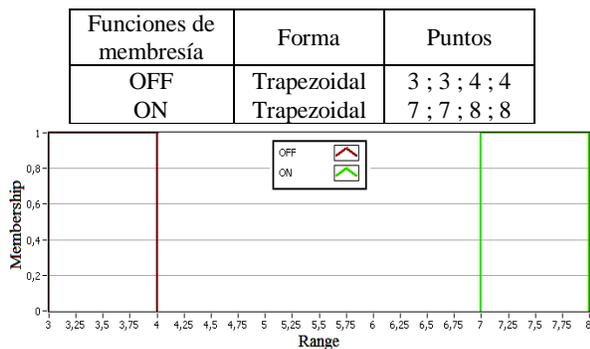


Figura 7. Funciones de membresía de Elv1.

Reglas (Rules)

- IF 'tiempo(min)' IS 'tLlenDos' THEN 'Elv1' IS 'ON' ALSO 'Hor1' IS 'ON'
(Si tiempo es de llenado a dosificador, entonces activar electroválvula E1 y también calefactor H1)
- IF 'tiempo(min)' IS NOT 'tLlenDos' THEN 'Elv1' IS 'OFF' ALSO 'Hor1' IS 'ON'
(Si tiempo no es de llenado a dosificador, entonces desactivar electroválvula1 y activar calefactor H1)

3Maceración.fs

En la Tabla2 se muestran las variables de entrada (temperatura y tiempo) y salida (calefactor Hor2 y Bomba Bom1) al sistema difuso correspondiente a la etapa de maceración (tanque macerador).

Tabla 2

Variables de entrada y salida al sistema difuso (etapa de maceración).

Nombre	Rango	Número de funciones de membresía
Variables de entrada:		
Temperatura (°C)	0 a 5	3
Tiempo (min)	0 a 5	2
Variables de salida:		
Hor2	0 a 10	2
Bomb1	0 a 10	2

Entrada de funciones de membresía (membership). En las Figuras 9 y 10 se muestran las funciones de membresía para las variables de entrada temperatura y tiempo.

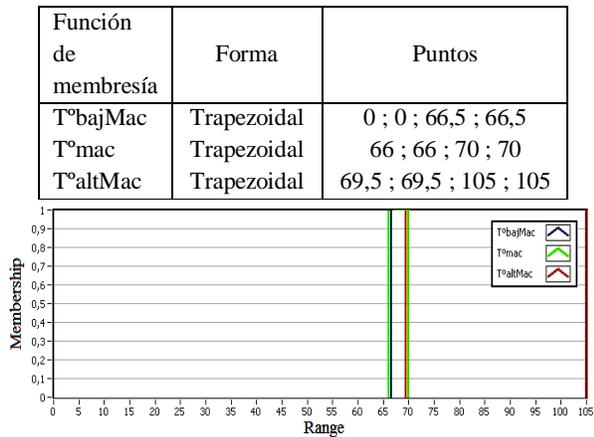


Figura 9. Funciones de membresía de temperatura.

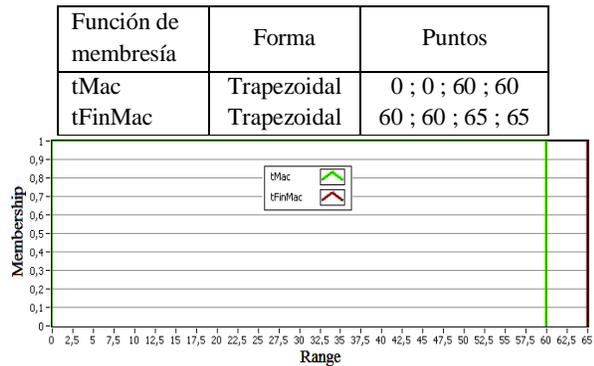


Figura 10. Funciones de membresía de tiempo.

Reglas (Rules)

1. IF 'temperatura' IS 'T°bajMac' THEN 'Hor2' IS 'ON' (Si temperatura es baja en maceración, entonces activar calefactor H2).
2. IF 'temperatura' IS 'T°altMac' THEN 'Hor2' IS 'OFF' (Si temperatura es alta en maceración, entonces desactivar calefactor H2).
3. IF 'temperatura' IS 'T°mac' AND 'tiempo' IS 'tMac' THEN 'Hor2' IS 'ON' (Si

temperatura y el tiempo es de maceración, entonces activar calefactor H2).

4. IF 'temperatura' IS 'T°altMac' AND 'tiempo' IS NOT 'tMac' THEN 'Hor2' IS 'OFF' (Si la temperatura es alta y el tiempo no es de maceración, entonces desactivar H2)

Salida de las funciones de membresía. En las Figuras 11 y 12 se muestran las funciones de membresía para las variables de salida: calefactor Hor2 y para la bomba Bom1.

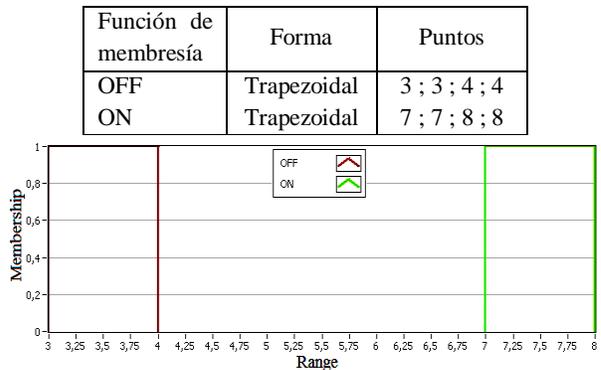


Figura 11. Funciones de membresía del calefactor Hor2.

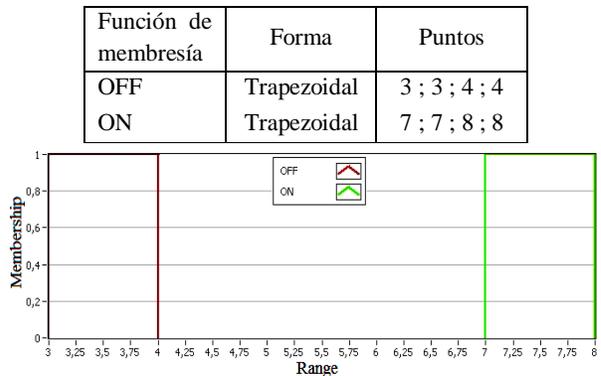


Figura 12. Gráfica para las funciones de membresía para la bomba Bom1.

La distribución de los equipos para el proceso automático se muestra en la Figura 13. El trasvase del material de un tanque a otro es por gravedad.

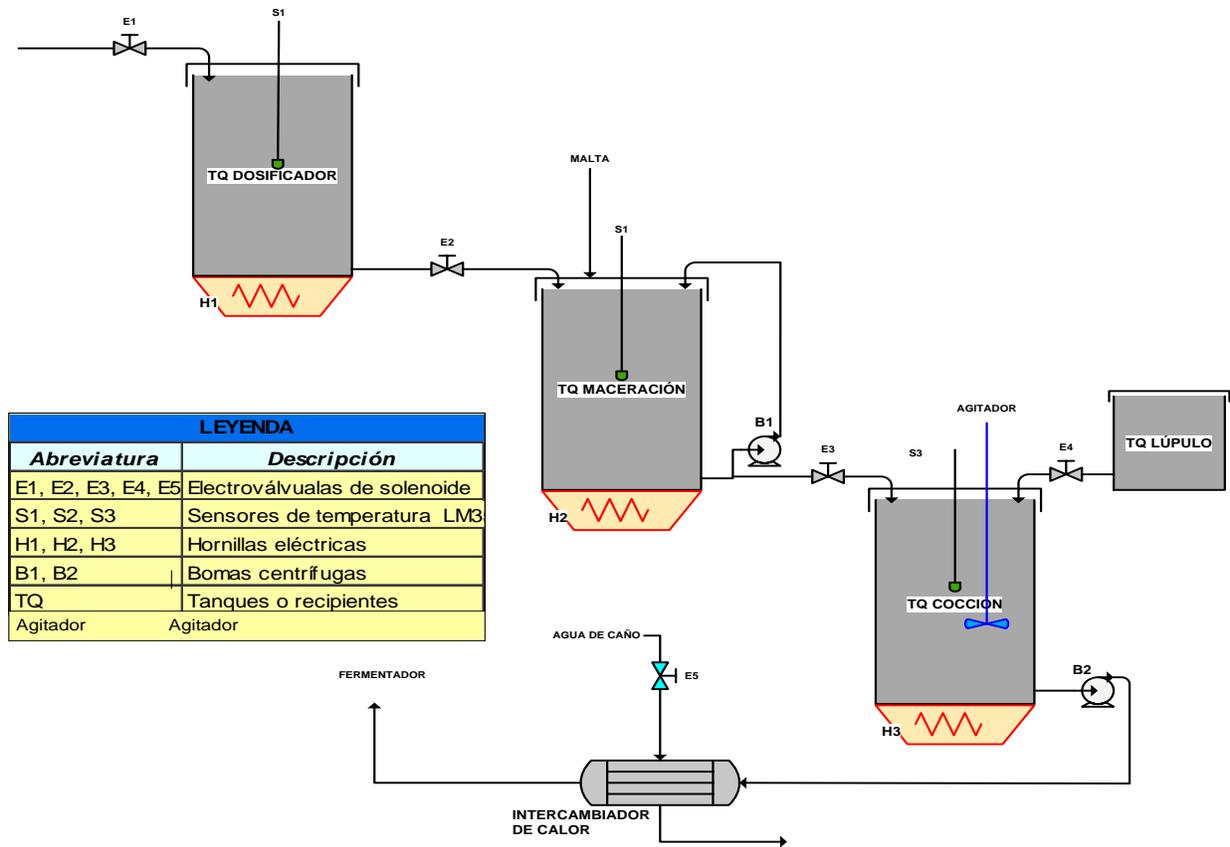


Figura 13. Diagrama de distribución de equipos y de las operaciones automatizadas.

La tarjeta de adquisición de datos constó de 3 salidas para sensores (sensoresLM35) y 11 relés para actuadores (Figura 14).

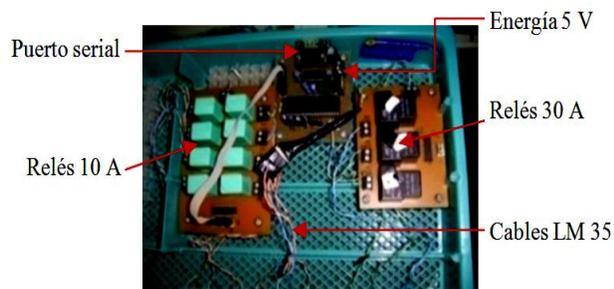


Figura 14. Tarjeta de adquisición de datos y tarjetas de control de actuadores.

En la programación de LabVIEW, el panel frontal quedó como se muestra en la Figura

15, en donde en la parte izquierda se muestra la elección de puerto serial, los tiempos de cada operación secuencial y en su parte superior derecha la grafica, para observar el comportamiento de las temperaturas en los tanques. Asimismo la tarjeta de adquisición de datos y sus respectivas tarjetas de relés se dispusieron en la parte superior derecha del estante.

Los calefactores H1, H2 y H3 son hornillas eléctricas de 3 kW y se hallan en la parte inferior de cada tanque.

Los sensores de temperatura (LM35) se dispusieron en el interior de cada tanque. Los sensores de temperatura LM35 son integrados cuya lectura está en función de su voltaje leído (Baldor Electric Company, 1996).

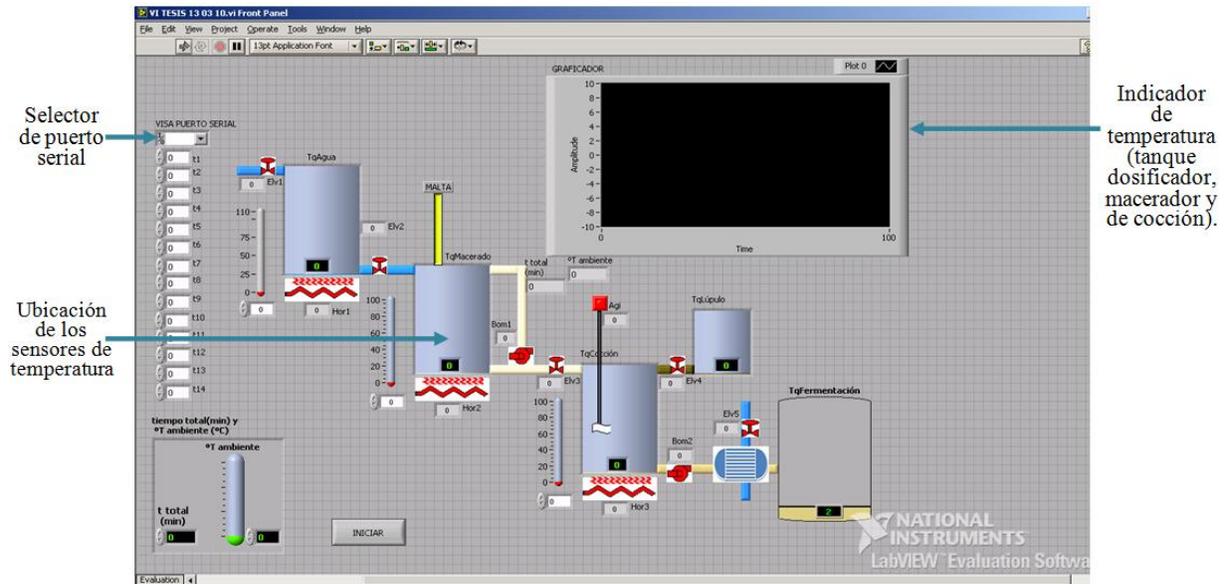


Figura 15. Panel frontal del proceso de producción de cerveza controlado por lógica difusa (maceración-cocción).

3. Resultados y discusión

La cerveza obtenida mostró una apariencia algo turbia, característico de una cerveza artesanal. Toda cerveza debe presentar un aspecto característico, siendo éste límpido o turbio, con o sin presencia de sedimentos, propios de la cerveza.

El anhídrido carbónico (CO₂) formado se produjo por la adición de azúcar (6 g/L). En una cerveza el CO₂ deberá ser superior a 0.3% p/p, lo cual tiene que ver con la presentación de la cerveza y su aceptación, sin embargo esto depende del tipo de cerveza (Código Alimentario Argentino, 2002).

La desintegración de las proteínas y de elevado peso molecular, mejoran la estabilidad de la espuma pero pueden estar relacionados con la formación de turbidez (Kirk *et al.*, 2000).

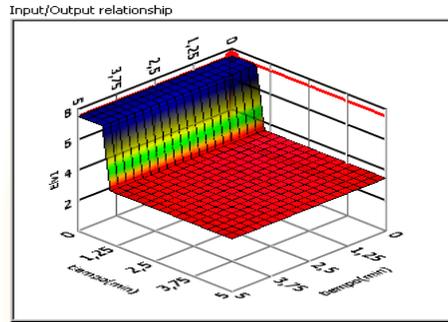
Modelos gráficos para variables de entrada y salida

Los modelos gráficos en el análisis de datos posibilitan tener una idea general de un proceso, cualesquiera sea su origen. En modelo gráfico en un control a base de reglas

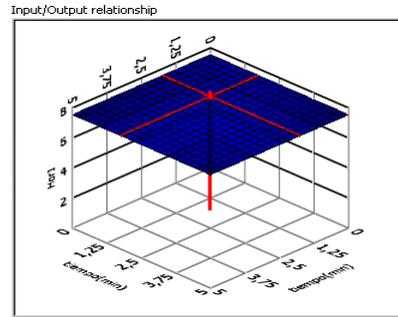
difusas permite ver el comportamiento de las variables de salida (normalmente actuadores), que dependen de los valores de las variables de entrada (adquiridas mediante una tarjeta DAQ y sus sensores), posibilitando la modificación de los valores de las funciones de membresía y aun más sus propias reglas difusas. Las formas de los conjuntos difusos son trapezoidales y triangulares para tener una rápida simulación y por la facilidad en la descripción de los parámetros para estas formas. Para ajustar y mejorar el desempeño del controlador se pueden seleccionar otras formas de conjuntos difusos como campana gaussiana, que tiene parámetros como el centro, la desviación y la varianza, que hacen más difícil y compleja su descripción (Marulanda *et al.*, 2008).

Relación gráfica tiempo-electroválvula E1 y calefactor H1

El comportamiento gráfico de los actuadores (electroválvula E1 y calefactor H1) en función del tiempo se puede apreciar en las Figura 16 (a y b). En estos modelos gráficos las componentes X e Y corresponden a la variable tiempo, siendo Z el actuador.



(a) Relación tiempo y electroválvula E1

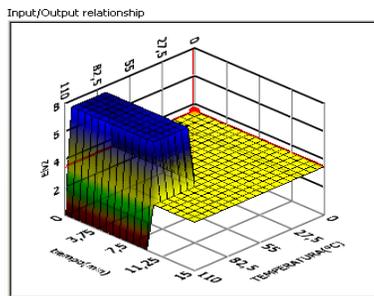


(b) Relación tiempo y calefactor H1

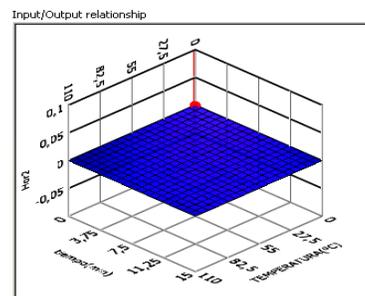
Figura 16. Comportamiento de (a) electroválvula E1 y (b) calefactor H1

Relación gráfica tiempo-temperatura-electroválvula E2, calefactor H2, bomba B1, electroválvula E3, electroválvula E4, calefactor H3, agitador agi, bomba B2 y electroválvula E5. El comportamiento gráfico de los actuadores (E2, H2, B1, E3, E4, H3,

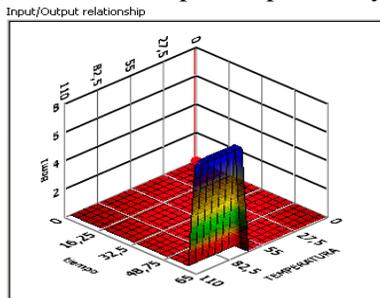
agi, B2 y E5) en función del tiempo y la temperatura se puede apreciar en las Figuras 17 y 18. En las Figuras siguientes se puede notar que el eje X de corresponde a la variable “tiempo”, al eje Y “la temperatura” y al eje Z los correspondientes contactores.



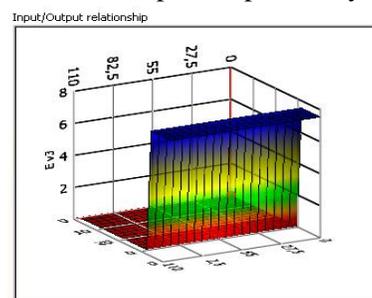
(a) Relación tiempo, temperatura y E2



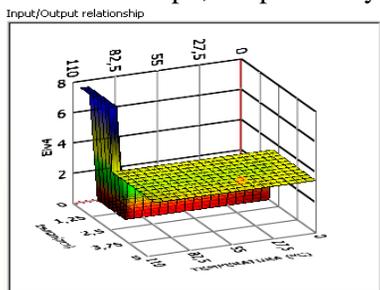
(b) Relación tiempo, temperatura y H2



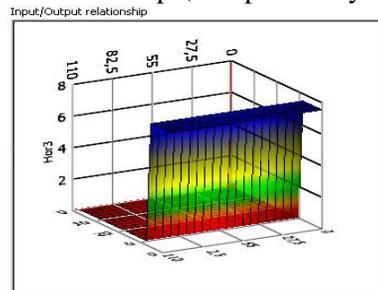
(c) Relación tiempo, temperatura y B1



(d) Relación tiempo, temperatura y E3



(e) Relación tiempo, temperatura y E4



(f) Relación tiempo, temperatura y H3

Figura 17. Comportamiento de (a) electroválvula E2, (b) calefactor H2, (c) bomba B1, (d) electroválvula E3, (e) electroválvula E4 y (f) calefactor H3.

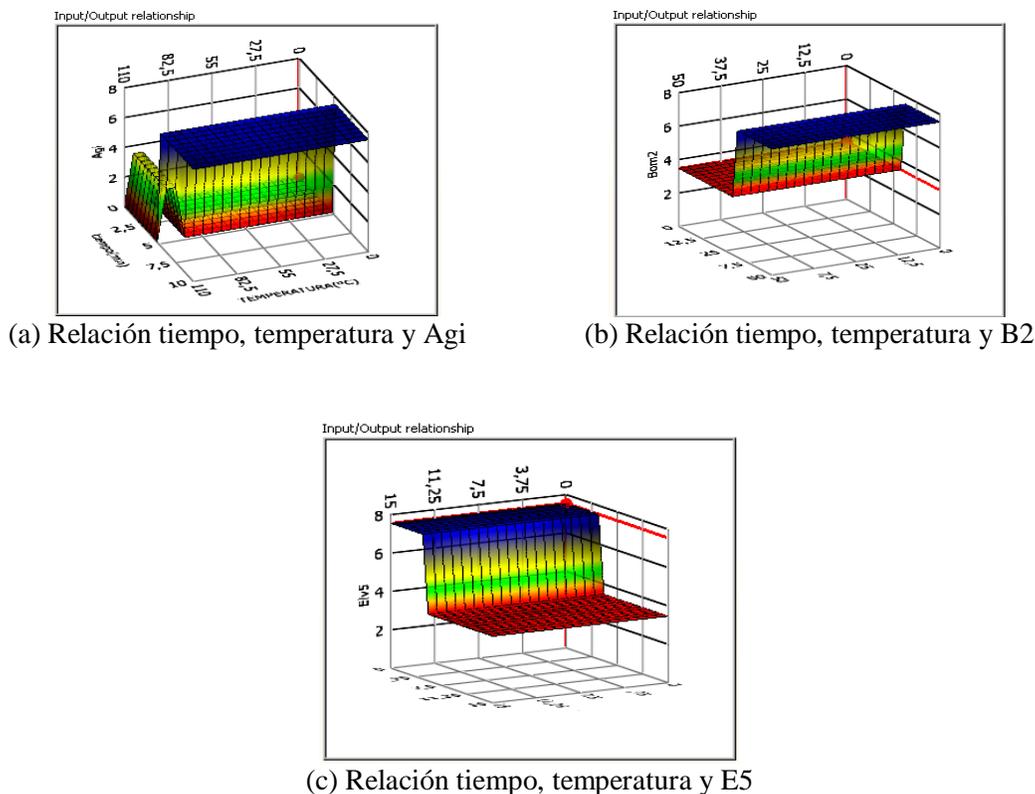


Figura 18. Comportamiento de (a) agitador Agi, (b) bomba B2, (d) y electroválvula E5.

En las figuras anteriores el eje Z corresponde a las variables de salida que en este caso son los 11 actuadores utilizados en el proceso automatizado, donde se hallan los valores del estado de activado (rango de 7 a 8) y de desactivado (rango de 3 a 4). De la misma forma los ejes X e Y corresponde a las variables de entrada como son el tiempo y la temperatura, en rangos que depende de la etapa en la que participa el actuador.

Las formas que se muestran en las Figuras 16-b y 17-b corresponden a actuadores que mantienen en su etapa correspondiente un único valor, puede que se mantengan activados o desactivados; a diferencia de las demás gráficas que cuentan varias posiciones de acuerdo a sus respectivas variables independientes como son el tiempo y la temperatura (Figura 17a hasta 17f y Figura 18a hasta 18c ó solamente el tiempo como es el caso para la Figura 16a y 16b).

Calidad fisicoquímica

En la Tabla 3 se resumen las características fisicoquímicas que se obtuvo mediante la automatización parcial por lógica difusa del proceso de elaboración de cerveza tipo ale.

Tabla 3

Características fisicoquímicas de la cerveza artesanal.

Parámetro	Valor
Densidad (g/cm ³)	0.9825
pH	3.9013
Acidez total (%-ácido láctico)	0.8743
Grado alcohólico (°GL)	6.2438
CO ₂ (%p/v)	0.9138

La densidad promedio de la cerveza producida fue de 0.9825 g/cm³, valor que se justifica por la presencia de CO₂ y etanol en su composición.

El pH promedio de la cerveza que fue de 3.9013. La Norma Técnica de Cerveceros Latinoamericanos, indica que el pH debe estar entre los valores de 3.0 a 4.8. Según Norma Técnica N° 213.014-Febrero de 1973 (INDECOPI-Perú) las cervezas deben tener un pH entre 3.8 a 5.0 (Silva, 2007).

La acidez total promedio expresada como ácido láctico de la cerveza fue de 0.8743 %. La Norma Técnica de la Asociación Latinoamericana de Fabricantes de Cerveza indica que debe estar dentro del rango de 0.1-0.4 %. La formación de ácido láctico es ocasionada por las bacterias lácticas que se encuentran en la cerveza joven, desviando el ciclo de formación del alcohol en el momento de la formación de piruvato. Para la formación de alcohol la primera transformación que sufre la glucosa es a piruvato, luego a acetaldehído y finalmente a etanol (Broderick, 1977).

El grado alcohólico promedio obtenido de la cerveza fue de 6.2438 °GL. Según la Norma Técnica N° 213.014 - Febrero de 1973 (INDECOPI - Perú), las cervezas deben no contener más del 6% de alcohol en volumen (Silva, 2007), sin embargo para la Norma Técnica de la Asociación Latinoamericana de Fabricantes de Cerveza debe estar en el rango de 2.5 a 9 % (ALAFACE, 1999).

La concentración de CO₂ de la cerveza fue de 0.9138 %p/v. La Norma Técnica de la Asociación Latinoamericana de Fabricantes de Cerveza menciona que, ésta debe estar en el rango de 2.4 - 3.6 (%p/v). Las concentraciones bajas de CO₂ es característico de cervezas artesanales que emplean azúcar como productor de CO₂ (Vogel, 2003).

4. Conclusiones

Mediante el control automático parcial por lógica difusa del proceso de elaboración de

cerveza artesanal en las etapas de maceración y cocción, se logró controlar adecuadamente los actuadores: bombas, calefactores y electroválvulas; empleando un tiempo aproximado de 4 horas. El control de temperatura implementando por Lógica Difusa posee la ventaja de no necesitar un modelo matemático preciso del sistema a controlar. Las características fisicoquímicas promedio para la cerveza artesanal obtenida mediante el control automático por lógica difusa de las etapas de cocción y maceración fueron: densidad de 0.9825 g/cm³; pH de 3.9013; porcentaje de acidez total expresado en ácido láctico de 0.8743 %, grado alcohólico de 6.244 °GL y un porcentaje de CO₂ de 0.914 % p/v.

Referencias

- ALAFACE. 1999. Asociación Latinoamericana de Fabricantes de Cerveza. Métodos de Análisis Cerveceros. Tomo II. Caracas-Venezuela.
- Baldor Electric Company. 1996. Introducción al Control de Procesos. USA.
- Broderick, H. M. 1977. El Cerveceros en la Práctica. Editorial Borrada. Segunda Edición. USA.
- Carbajal, F. 2005. Cerveza. Madrid-España. Disponible en: <http://www.elergonomista.com/alimentos/cerveza.htm>.
- Cerna, R. 2006. Determinación del Efecto Tiempo - Temperatura Durante el Proceso de Pasteurización Sobre el Color, Aroma y Flavor de Cerveza Usando Análisis Sensorial. Tesis para obtener el título en Máster de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad de Puerto Rico. Mayagüez, Puerto Rico. Disponible en: <http://www.revistavirtualpro.com/revista/index.php?ed=2007-05-01&pag=30>.
- Código Alimentario Argentino. 2002. Capítulo XIII. Bebidas Fermentadas. Cervezas. Argentina.
- Cotero, J. 2003. Control de Procesos. Control Clásico, Moderno y Control Inteligente. México. Disponible en: <http://www.mde.iteso.mx/titulacion/estudio%20de%20caso/ejemplos/marco%20teorico%20en%20progreso.pdf>
- Fodor, A. 1998. Espuma de la Cerveza. Disponible en: <http://www.revistamash.com/detalle.php?id=54>
- Gonzales, R. 2006. Elaboración de Cerveza. Disponible en: http://html.rincondelvago.com/cerveza_elaboracion.html.
- Gutiérrez, A.; Elizondo, A.; Días, A. 2002. Cervezas Artesanales: características fisicoquímicas y microbiológicas-comparación con cervezas industriales. Industrialización de Alimentos. Disponible en: <http://www4.inti.gov.ar/GD/4jornadas2002/pdf/ceial-022.pdf>
- Hellman, M. 2001. Fuzzy Logic Introduction. Disponible en: <http://www.fpk.tuberlin.de/~ander1/epsilon/fuzzyintro4.pdf>

- Huamán, J. 2009. Las Mypes en el Perú. Pequeñas y Medianas Empresas. <http://www.gestiopolis.com/innovacion-empredimiento/mypes-en-el-peru.htm>
- Kirk, R.; Sawyer, R.; Egan, H. 2000. Composición y Análisis de los Alimentos. Segunda Edición. Compañía Editorila S.A. México.
- Lira, J.; Tapia, V. 2007. Robot de Mini-Sumo Basada en Control Difuso. 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Disponible en: <http://www.ctrl.cinvesta.mx/~coordinacion/informesactivdca/infactiv-2007.pdf>
- Martínez, D. 2002. Elaboración de Cerveza. Asignatura: Bebidas. Disponible en: http://www.emagister.com/uploads_courses/Comunidad_Emagister_48282_48281.pdf
- Marulanda, J.; Barco, M.; López J. 2008. Control Inteligente De Un Reactor Químico. Grupo de Percepción y Sistemas Inteligentes. Universidad del Valle. Cali, Valle, Colombia. Disponible en: http://objetos.univalle.edu.co/files/Control_inteligente_de_un_reactor_quimico.pdf
- Méndez, Z.; Villegas, P. 2005. Los Sistemas Difusos como Herramienta de Modelación de la Producción Frutícola. Disponible en: <http://www.compelect.com.co/otros/diamatlab/2005/ResumenLogicaDifusa.doc>
- National Instruments. 2009. Manual de usuario. Introducción a LabVIEW.
- Puig, I. 2008. Conceptos Avanzados de Seguridad: Lógica Difusa. RADWARE antivirus. Disponible en: <http://www.cesca.es/promocio/congresos/radware/LogicaDifusaTecnica.pdf>
- Sanz, A. 2001. Lógica Borrosa. Incidencia en las Aplicaciones Industriales. España. Disponible en: http://www.cps.unizar.es/~te/Publicaciones_archivos/AE196P.pdf
- Silva, J. 2007. Cerveza: Producción. Universidad Nacional Inca Garcilaso de la Vega. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos54/cerveza/cerveza2.shtml>.
- Universidad de Jaén. 2002. Módulo III. Sistemas Basados en Reglas Difusas. España. Disponible en: http://www.di.ujen.es/asignaturas/cl/teoria/transparencias/tema5_cl.pdf.
- Universidad Pública de Navarra. 2006. Noticias: El Profesor de la Universidad Pública de Navarra Humberto Bustine Sola, uno de los 10 Investigadores del Mundo más Destacado en el Área de la Lógica Difusa Tipo 2. España. Disponible en: <http://www.unavarra.es/info/not2256.htm>.
- Vogel, W. 2003. Elaboración Casera de Cerveza. Editorial ACRIBIA, S.A. Zaragoza-España.