

# DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL APLICADO AL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN DE UNA PLANTA DE ELABORACIÓN DE CERVEZA

Jorge Gabriel Bonilla Rodríguez\*\*

Edison Xavier Cordero Loo\*\*

César Antonio Martín Moreno\*

\*\*Estudiantes de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación

\*Director de la Maestría de Automatización y Control Industrial, Director del Proyecto

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación (FIEC)

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Km. 30 ½ vía Perimetral Campus Gustavo Galindo, Guayaquil, Ecuador

[gbonilla@espol.edu.ec](mailto:gbonilla@espol.edu.ec) , [ecordero@espol.edu.ec](mailto:ecordero@espol.edu.ec)

## Resumen

*En el proceso de pasteurización, los microorganismos que son utilizados para la fermentación y putrefacción de la cerveza son mayoritariamente eliminados mediante temperaturas elevadas. El presente trabajo trata acerca de un estudio de factibilidad en la realización del proyecto, análisis de costos y rentabilidad de la automatización de un proceso de pasteurización del tipo flash para una industria cervecera. El fin de este trabajo es poder obtener las ventajas en costes, producción y sobre todo calidad del producto final de la pasteurización operando de forma automática. Para esto se considera un Controlador Lógico Programable para la adquisición, tratamiento y procesamiento de las señales generadas por los instrumentos de campo. El proceso estará monitoreado y supervisado continuamente, por lo que se desarrolla un sistema SCADA para monitoreo en sala de control, y para el campo se opta por una Interfaz Hombre Maquina. Se tomara en cuenta las diferentes normas y reglamentos vigentes en nuestro país al momento del diseño.*

**Palabras Clave:** automatización proceso de pasteurización, pasteurización de la cerveza, pasteurizador flash, proyecto automatización industrial.

## Abstract

*In the pasteurization process, the microorganisms that are used for the fermentation and rotting of beer are mainly eliminated by high temperatures. This project is about a study of feasibility for the implementation, cost analysis and the rent of the automation for the process of equipment for flash pasteurization in a beer industry. The main point of this job is to obtain the advantages in costs, production and mainly in the quality of the final product of the pasteurization working with an automation process. For this, we have considered a Programmable Logic Controller for the acquisition, treatment and process of the signals generated by the field instruments. The process will be monitored and supervised continuously, so and SCADA system will be developed for this task in an operation room, and for the field will be implemented a Human Machine Interface. It will be considered the different rules and standards that are in force in our country at the moment of the design.*

**Keywords:** automation of a pasteurization process, beer pasteurization, flash pasteurization, industrial automation project.

## 1. Introducción

Se realizará un estudio sistemático del proceso de pasteurización de la cerveza,

analizando las variables físicas del proceso para poder realizar el control respectivo, haciendo uso de

instrumentos de medición en las variables de nivel, flujo, conductividad, presión y temperatura. Para lograr estos objetivos se realizaron visitas de campo a una planta de elaboración de cerveza la cual tenía un sistema de pasteurización no automatizado. Con la ayuda de los datos recolectados en el campo, los planos técnicos del sistema facilitados por la persona encargada y la forma de trabajo que se desea del sistema, se procedió a recoger los datos de funcionamiento del sistema para poder realizar una lista de los equipos e instrumentos que se van a necesitar implementar para realizar el control del sistema. Los equipos, materiales e instrumentos que se han escogido cumplen con los requerimientos de las normas para la instalación en una industria en nuestro país.

Al ser un proceso automatizado las decisiones del desarrollo del proceso se las realizará mediante un Controlador Lógico Programable, el cual se lo definió según las necesidades de capacidad, comunicación con la red industrial de la planta y los requerimientos y facilidades de la empresa.

Al final se presentará un análisis de factibilidad económica del estudio realizado y las ventajas que nos brinda el proceso operado de forma automática ante el convencional antes instalado, realizando análisis de costos de la inversión y recuperación del capital en el futuro.

## 2. Descripción del Proceso

El pasteurizador flash tiene como característica principal de operación usar un intercambiador de placas con tres zonas de temperaturas específicas:

- Zona de intercambio
- Zona de calentamiento
- Zona de enfriamiento

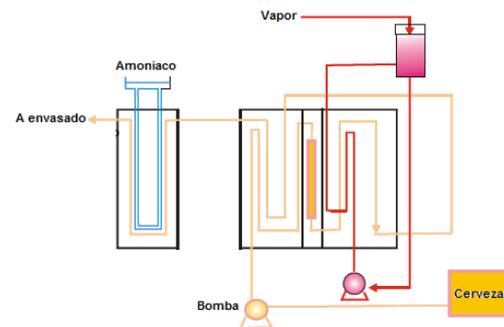


FIGURA 1. CIRCUITO DE PASTEURIZACION

La cerveza se mantiene en el tanque de cerveza filtrada, desde donde es bombeada al pasteurizador de placas por las tres secciones.

La primera sección, llamada regenerativa, de intercambio o ahorro energético, donde la cerveza entrante se encuentra en contracorriente con la ya pasteurizada que cede calor a la primera.

La segunda sección, es la pasteurización propiamente dicha, donde la cerveza se calienta hasta unos 72°C. Esto se lo realiza con un circuito secundario cerrado donde se mantiene circulando vapor de agua externo.

La tercera sección, es la de enfriamiento, donde la cerveza se enfría a 0°C con amoníaco. Esta etapa final es de gran importancia debido a que la cerveza por ser un producto de obtenido de material orgánico y de forma natural, si se la deja durante un tiempo largo expuesta a altas temperaturas, tenderá a fermentarse y por consecuente a dañarse.

En el tubo de mantenimiento la cerveza está a 72°C durante unos 30 segundos. El tratamiento total en el pasteurizador lleva sólo dos minutos, con lo que las cualidades organolépticas de la cerveza no se ven afectadas.

## 3. Diseño y Selección de Equipos de Control y Monitoreo

La automatización es solo posible a través de elementos que sensen lo que sucede en el ambiente del proceso, para luego tomar una acción de control pre-programada que actúe sobre el sistema para obtener el resultado previsto.

Para el caso de los tanques del proceso se procederá a utilizar los sensores de nivel tipo de funcionamiento por vibración, debido a que sólo requerimos conocer el estado de los líquidos en los tanques, si está vacío o lleno. Se necesitan 7 sensores que determinaran nivel alto y bajo con las características antes especificadas.

La medición de la variable temperatura es una de las más importantes dentro de este proceso en el cual tenemos 3 clases de fluidos: agua, soda para la limpieza y cerveza en pasteurización. En base estos criterios, el sensor de temperatura a usar es una Pt100 la cual pertenece a la familia de las RTD's y cumple con todos los requerimientos del sistema a diseñar.

Se escogió un sensor de flujo magnético, ya que se necesita que el método de medida sea no invasivo, garantizando así que la calidad del producto no se vea afectado por ningún agente extraño.

Se ha escogido el sensor de presión tipo piezoeléctrico ya que está diseñado para poder realizar la lectura de presión de gas, vapores y líquidos, por lo que sirve para la medición de la presión de salida del amoniaco del sistema de refrigeración, además de que trabaja en el rango de temperatura del R-717 que es el refrigerante del proceso.

La conductividad de una sustancia tiene gran dependencia de la temperatura. La conductividad de la sustancia aumenta con el cambio de temperatura. Este aumento se expresa en  $\%/^{\circ}\text{C}$  que se denomina coeficiente de temperatura. Para poder aplicar esta compensación se contará con un sensor el cuál contenga células de conductividad que alberguen en su interior un sensor de temperatura.

Los sensores inductivos son instrumentos que detectan el cambio de inductancia debido a la presencia de un objeto, especialmente metálico. Los vamos a utilizarlos para poder conocer como se tiene conectado al sistema para que opere, si está listo para operar la pasteurización o realizar la limpieza.

### 3.1 Selección del PLC

Se debe considerar cuales son las necesidades definidas para la solución de nuestro proyecto y revisar los beneficios que un PLC otorga, y con esto buscar cuál será el producto adecuado a utilizar:

- Escalabilidad y flexibilidad en cuanto a configuración para el control de 138 variables que requiere el proceso.
- Facilidad de integración con la red de gestión para "process management" que se encuentra configurada en Industrial Ethernet.
- Debe existir gran flexibilidad para la implementación de un sistema SCADA programado en InTouch y posibilitar la interacción con un panel de control, es decir que posea los drivers de comunicación.
- Posibilidad de implementar redundancias que facilitan su aplicación en sistemas de enclavamientos y seguridad.

Para poder controlar el número de variables que se han determinado en el proyecto se ha escogido de la familia SIEMENS el modelo S7-200. El CPU como mínimo deberá ser el 224 ya que este permite comunicación vía Ethernet con la ayuda de una tarjeta de comunicación CP243-1.

Sin embargo, en base a los criterios de selección antes mencionados se escogió el PLC S7 300 de la marca SIEMENS con CPU 315 2DP con una tarjeta de comunicación CP343. El CPU se lo escogió principalmente por motivos económicos ya que en planta existe uno en stock con estas características.

Las tarjetas de entradas salidas se las selecciono en base a un estudio de campo en la que se realizo una inspección que se observa en la tabla 1.

TARJETA ENTRADAS DISCRETAS				
No.	TIPO	CODIGO	ESTADO	DESCRIPCION / UBICACION
1	E2.0	SL1-802B	1	Sensor de nivel de amoniaco dentro de tanque de enfriamiento
2	E2.1	SL6-807B	1	Sensor de nivel alto en el tanque de cerveza pasteurizada
3	E2.2	SL7-808B	1	Sensor de nivel bajo en el tanque de cerveza pasteurizada
4	E2.3	SL8-801B	N	Sensor de nivel bajo en el tanque de etapa de calentamiento
5	E2.4	SV1-802B	N	Sensor de presencia inductivo de tubería de entrada de cerveza
6	E2.5	SV2-803B	N	Sensor de presencia inductivo de tubería de salida de cerveza
7	E2.6	K1-809E	N	Confirmación de encendido de motor de cerveza
8	E2.7	K2-806E	N	Confirmación de encendido de motor de cerveza
9	E3.0	K3-807E	N	Confirmación de encendido de motor de cerveza
10	E3.1	K4-808E	N	Confirmación de encendido de motor de etapa de calentamiento
11	E3.4	K5-802E	N	Confirmación de encendido de motor de CIP
12	E3.5	T1-202E	N	Funcionamiento de térmico motor de cerveza
13	E3.6	T2-203D	N	Funcionamiento de térmico motor de etapa de calentamiento
14	E3.7	T3-207D	N	Funcionamiento de térmico motor de CIP

TARJETA DE SALIDAS DIGITALES				
No.	TIPO	CODIGO	ESTADO	DESCRIPCION / UBICACION
1		VLV04-801E	1	Electroválvula entrada de agua en etapa de calentamiento
2		VLV07-802E	1	Electroválvula de entrada de amoniaco en etapa de enfriamiento
3		VLV01-803E	N	Electroválvula de entrada de agua de proceso de pasteurización
4		VLV03-804E	N	Electroválvula de purga de proceso de pasteurización
5		K1-809E	N	Contactador de motor de cerveza
6		K2-806E	N	Contactador de motor de cerveza
7		K3-807E	N	Contactador de motor de cerveza
8		K4-808E	N	Contactador de motor de etapa de calentamiento
9		K5-802E	N	Contactador de motor de CIP

TARJETA DE ENTRADAS ANALOGAS 4 - 20 mA.				
No.	TIPO	CODIGO	ESTADO	DESCRIPCION / UBICACION
1	4 - 20 mA.	ST1-1002E	1	Sensor de temperatura de agua en etapa de calentamiento
2	4 - 20 mA.	ST2-1004E	1	Sensor de temperatura de cerveza en serpentín
3	4 - 20 mA.	ST3-1006E	1	Sensor de temperatura de salida de cerveza
4	4 - 20 mA.	SF1-1101E	N	Sensor de presión de salida de amoniaco en etapa de enfriamiento
5	4 - 20 mA.	SD1-1105D	N	Sensor de conductividad en proceso de pasteurización
6	4 - 20 mA.	SF1-1107D	N	Sensor de flujo a la salida de la cerveza

TARJETA DE SALIDAS ANALOGAS				
No.	TIPO	CODIGO	ESTADO	DESCRIPCION / UBICACION
1	4 - 20 mA.	VLV01-1202B	1	Electroválvula en salida de cerveza
2	4 - 20 mA.	VLV05-1204E	N	Posicionador válvula entrada de vapor en etapa calentamiento
3	4 - 20 mA.	VLV08-1206B	N	Electroválvula en salida de amoniaco en etapa de enfriamiento

TABLA1. Listado de parámetros de entradas y salidas

### 3.2. Comunicación

La CPU 315-2DP que tiene el PLC tiene dos puertos de comunicación, uno para Profibus DP y otro para MPI, pero los requerimientos de comunicación de nuestro proyecto son de un puerto para conectarse con la red industrial, un puerto para el control del operador en cuarto de control y uno para el panel de control. Por lo que se ha optado por usar dos puertos de comunicación Profibus DP para conectarse a la red industrial y panel de control y el puerto MPI para el cuarto de control.

### 3.3. Criterios para la instalación

Para determinar la capacidad del breaker principal se debe calcular cuál es la corriente de todo el sistema. Para

comenzar se tienen los motores para las tres bombas:

$$I_f = I_{placa} + f_{CT} + f_{C\#C}$$

$$I_n = I_f \times f_{Iconcontinua}$$

Donde:

$I_f$ : Corriente corregida por factores físicos

$I_{placa}$ : Corriente de motor en placa según fabricante

$f_{CT}$ : Factor de corrección por temperatura en sitio

$f_{C\#C}$ : Factor de corrección número de cables en tubería

$f_{Iconcontinua}$ : Factor de corrección horas de trabajo (1.25)

**Bomba de cerveza:**

$$V = \frac{420}{725} V$$

$$I = 34.5A$$

$$P = 18.5KW$$

Entonces se tiene que  $I_{n1} = 40.538A$

**Bomba de agua:**

$$V = 440V$$

$$I = 5.5A$$

$$P = 3KW$$

Entonces se tiene que  $I_{n2} = 6.463A$

**Bomba de CIP:**

$$V = 440V$$

$$I = 13.8A$$

$$P = 7.5KW$$

Entonces se tiene que  $I_{n3} = 16.215A$

Además de las bombas en el sistema principal se tiene conectado los transformadores de control y fuentes de alimentación para los elementos de campo:

Un transformador de 120V en secundario para conectar los siguientes equipos:

- Alimentación del PLC
- Alimentación de sensor de flujo
- Alimentación de transmisor de sensor de conductividad
- Alimentación de siete sensores de nivel

Se ha determinado una corriente  $I_{n4} = 0.34A$ , por lo que se usará un transformador de control con una capacidad de 80VA.

Una fuente DC de 24V para la conexión de los siguientes elementos:

- Alimentación de sensor de presión
- Alimentación de dos inductivos
- Alimentación de tres sensores de temperatura
- Alimentación para estabilizador ferresonante para el panel de control con una capacidad de 0.8A

Se necesitará una corriente  $I_{n5} = 1.15A$ , por lo que se procederá a adquirir una fuente de alimentación de capacidad de 1.2 A

$$I_N = I_{n1} + I_{n2} + I_{n3} + I_{n4} + I_{n5}$$

$$I_N = 64.706A$$

Se debe recalcular la corriente de trabajo principal debido a los factores de corrección siguientes:

$$I_S = I_N \times f_C \times f_S$$

$I_S$ : Corriente corregida a seleccionar

$f_C$ : Factor de corrección

$f_S$ : Factor de corrección de seguridad del fabricante

$$I_S = 64.706 \times 0.5 \times 2.5$$

$$I_S = 80.8825 A$$

Con estos valores podemos escoger un breaker principal con las siguientes características:

Marca	Siemens
Modelo	3LD2714-0TK53
Tensión asignada de empleo $U_e$	400 V (NEMA)
Tensión asignada al impulso $U_{imp}$	10 KV
Rango de Operación	hasta 100 A
Rango de Temperatura	-25 a 70°C

Además se va a incluir los siguientes elementos en el panel:

- Elementos de control para cada uno de los motores de las bombas (breakers, contactor y térmico). En total serán tres breakers, tres contactores y tres térmicos.
- Dispositivos de conexión entre el PLC y los instrumentos de campo, SIMATIC TOP connect y SIMATIC TOP connect TPA.
- Borneras para conexión entre el transformador y los dispositivos de control intermedio y alimentación de dispositivos de campo.
- El panel de control será montada sobre el panel frontal de la puerta principal.

Para facilitar la posible inspección interior del tablero, todos los componentes eléctricos estarán fácilmente accesibles por el frente mediante una puerta abisagrada que permitirá una apertura mínima de 90°.

Todas las uniones estarán atornilladas formando un conjunto rígido y de esta manera asegurar la perfecta puesta a tierra de las masas metálicas y la equipotencialidad de todos sus componentes. Los tornillos tendrán un tratamiento anticorrosivo en base de zinc. Debido a las masas metálicas del tablero estarán eléctricamente unidas entre sí y al conductor principal de protección de tierra.

Todos los componentes eléctricos se montarán sobre rieles específicos para sujeción.

El sistema de ventilación será por convección natural permitiendo el funcionamiento de los componentes de maniobra y control dentro de los límites

de temperatura recomendada por la norma.

#### 4. Programación del PLC

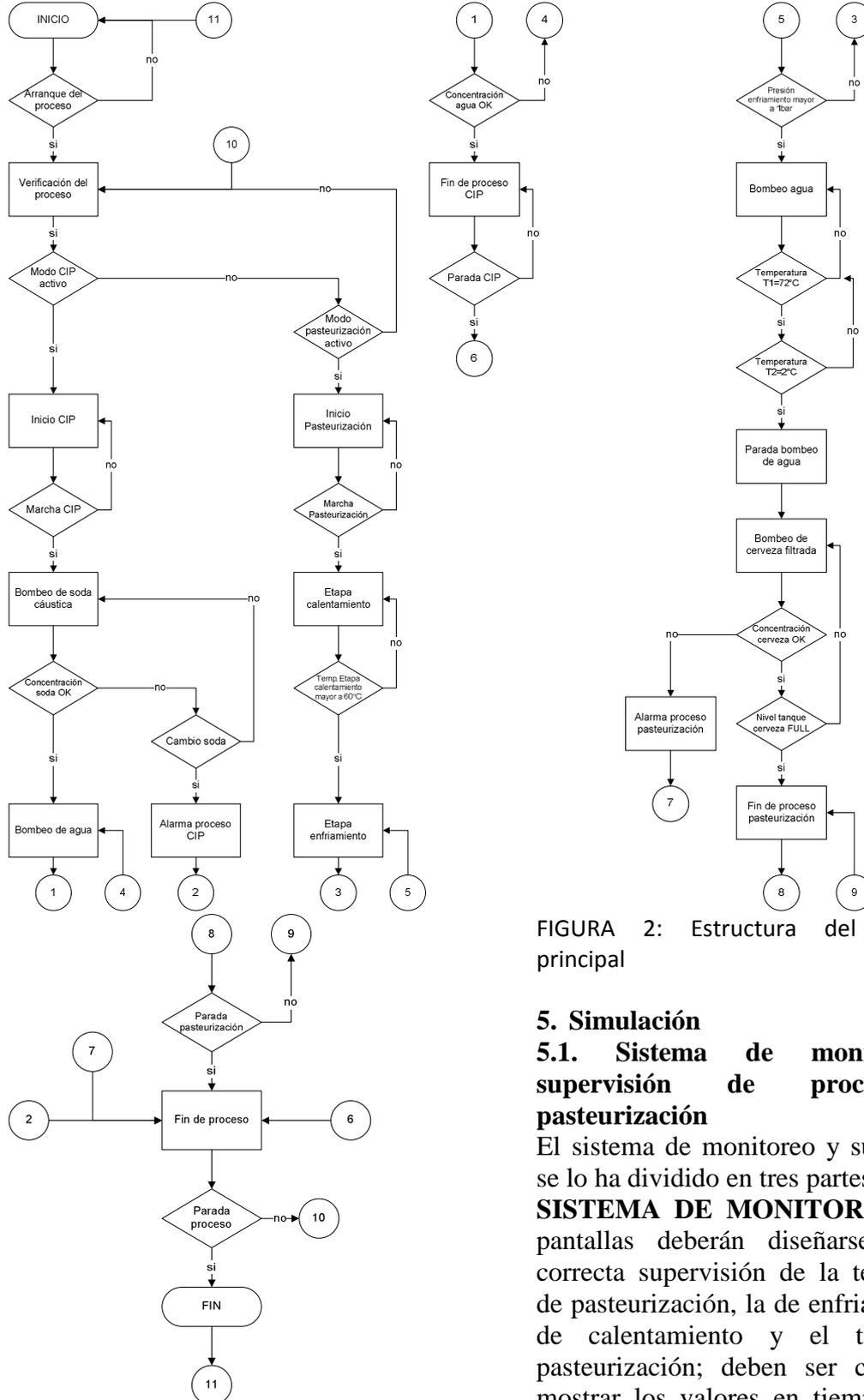


FIGURA 2: Estructura del programa principal

#### 5. Simulación

##### 5.1. Sistema de monitoreo y supervisión de proceso de pasteurización

El sistema de monitoreo y supervisión, se lo ha dividido en tres partes:

**SISTEMA DE MONITOREO:** Estas pantallas deberán diseñarse para la correcta supervisión de la temperatura de pasteurización, la de enfriamiento, la de calentamiento y el tiempo de pasteurización; deben ser capaces de mostrar los valores en tiempo real de

dichas variables, por medio de indicadores, sliders, diales, etc.

**SISTEMA DE CONTROL:** En estas pantallas deben constar básicamente elementos para insertar datos de setpoints de las distintas variables que intervienen en el proceso además de los pulsadores, botones y gráficos de tendencia requeridos por el departamento de producción.

La secuencia de arranque y parada del proceso se debe mostrar de manera simplificada y visualmente se deben observar cómo cambian los atributos de los dispositivos para indicar el estado de la secuencia de operación.

**SISTEMA DE ALARMAS:** En el sistema existen distintas alarmas, su formato permite al usuario obtener información detallada de las fallas ocurridas a lo largo del proceso permitiendo al usuario una fácil ubicación de la falla y su pronta corrección.

## 5.2. Sistema de monitoreo de la limpieza

Comienza con el cambio de los codos correspondientes a cerveza y soda, el cual es detectado por los sensores inductivos, una vez que los sensores inductivos hayan detectado este cambio el operario podrá empezar con el proceso de limpieza, el tiempo de limpieza dependerá del estado de la soda caustica empleada, la concentración de esta y el tiempo de funcionamiento del pasteurizador, todos estos parámetros deben constar en la pantalla respectiva al proceso de limpieza, con el control de conductividad de la soda se logra un ahorro de la misma.

Cuando termina la fase de limpieza, entra en funcionamiento la etapa de empuje con agua la cual requiere que se encuentre cerrada la válvula del tanque de soda inmediatamente se enciende la bomba de agua durante el tiempo de enjuague mostrado en la pantalla a continuación se abre la válvula de

purga, finalizando así el proceso de limpieza.

## 6. Costo de la Implementación y Retorno de la Inversión

### 6.1. Proyección de la inversión

Equipos	\$ 65.747,04
Materiales	\$ 11.296,92
Mano de obra	\$ 15.229,99
<b>Total costo inversión</b>	<b>\$ 92.273,95</b>

TABLA 3. Proyección de inversión

### 6.2. Costo total del proyecto

CONCEPTO	COSTO FIJO	COSTO VARIABLE	TOTAL
<b>COSTO DEL SERVICIO</b>			
Materiales e insumos	\$ 21.900,00		\$ 21.900,00
Mano de obra indirecta	\$ 22.500,00		\$ 22.500,00
Mano de obra directa		\$ 15.650,00	\$ 15.650,00
<b>GASTOS DE FABRICACION</b>			
Depreciación	\$ 9.921,38		\$ 9.921,38
Activo diferido	\$ 1.300,00		\$ 1.300,00
<b>COSTO OPERATIVO</b>	<b>\$ 3.563,57</b>		<b>\$ 3.563,57</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$ 59.184,95</b>	<b>\$ 15.650,00</b>	<b>\$ 74.834,95</b>

TABLA 4. Costo total

Los costos se proyectan con una tasa de crecimiento del 4.31% por razones de inflación.

### 6.3. Ganancia proyectada por la implementación

Se tomo datos de la materia prima utilizada en el proceso de pasteurización. Estos datos son tomados del registro de trabajo a noviembre del 2009. Se ha estimado que después de la realización del proyecto:

AÑO	GANANCIA BARRILES	GANANCIA MATERIA PRIMA	GANANCIA TOTAL
1	\$ 4.881,71	\$ 156.890,82	\$ 161.772,53
2	\$ 5.614,05	\$ 156.890,82	\$ 162.504,87
3	\$ 6.148,82	\$ 156.890,82	\$ 163.039,64
4	\$ 6.734,52	\$ 156.890,82	\$ 163.625,34
5	\$ 7.376,02	\$ 156.890,82	\$ 164.266,84
6	\$ 8.078,62	\$ 156.890,82	\$ 164.969,44
7	\$ 8.848,15	\$ 156.890,82	\$ 165.738,97
8	\$ 9.690,98	\$ 156.890,82	\$ 166.581,80
9	\$ 10.614,10	\$ 156.890,82	\$ 167.504,92
10	\$ 11.625,14	\$ 156.890,82	\$ 168.515,96

TABLA 5. Ganancia

El factor de actualización del 10% toma en cuenta el costo de oportunidad considerando un promedio de las tasas de interés bancario. Este factor también está referido al valor del dinero en el tiempo.

Una vez hecho los cálculos de VAN se encontró que este tiene un valor, al final a los 10 periodos de \$691,344.78 y un TIR del 54%.

Además se obtuvo una relación beneficio costo mayor a 4 y se ha calculado la recuperación del capital de inversión al noveno mes de operación.

### **CONCLUSIONES**

- Con la implementación de control por medio de un PLC se logra minimizar el cableado de control presente y centralizar el control del sistema.
- El sistema de control instalado se encuentra sobredimensionado con el fin de posibilitar en un futuro a la empresa añadir otros elementos para el control del sistema según lo encuentren conveniente.
- Al momento de realizar el estudio factibilidad del sistema a

implementar se encontró que existirá un ahorro de alrededor del 15% de soda cáustica y de 5% de agua suave por año.

- Con la implementación del sistema se produce una recuperación del 5% de cerveza a despechar anual que se tenía como desperdicio debido al funcionamiento del mismo.
- Tomando en cuenta los puntos anteriores este proyecto se vuelve rentable económicamente ya que la inversión es muy pequeña en comparación de los beneficios que esta traería. Económicamente nos valemos de los valores de VAN que es de USD\$691.344,78 y un TIR superior al 54%, los cuales nos indican que el proyecto es muy factible y se ha calculado un retorno de la inversión del sistema para unos 9 meses desde su puesta en marcha.

## REFERENCIAS.

- Romeo J, Díaz L, González-Gross M, Wärnberg J y Marcos A. 2006. Contribución a la ingesta de macro y micronutrientes que ejerce un consumo moderado de cerveza.
- Procesos de transferencia de calor DONALD Q. KERN ,1999
- SIMATIC NET White Paper Basics of Industrial Ethernet, Siemens
- CONTROL VALVE HANDBOOK de Emerson Fisher Valves
- OPC Unified Architecture de Wolfgang, Steffan y Matthias.
- Instrumentación Industrial de Antonio Creus Solé
- Practical industrial networks: design, installation and troubleshooting; mackay, park, wright, reynders, 2004.
- Dufour M, Simmonds RS, Bremer PJ. 2004. Development of a laboratory scale clean-in-place system to test the effectiveness of "natural" antimicrobials against dairy biofilms.
- Biotecnología de la cerveza y la malta. J. S. Hough. Zaragoza Acribia, 1990. Beer pasteurization: (manual of good practice) Prepared by the EBC Technology and Engineering Forum. Nürnberg: Getränke – Fachverlag Hans Carl, 1995.