

Diseño de la Automatización de un prototipo de línea de producción de quesos.

Vega C. Carlos. Mejía Cosme.

Facultad en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte.
cjvega@utn.edu.ec, cdmejia@utn.edu.ec

Resumen— En el país existe una considerable producción de quesos de forma artesanal, para su fabricación existe un alto grado de desgaste físico. Con una baja asepsia en la manipulación de materia en elaboración, por tal motivo este proyecto ayuda a solucionar la necesidad con el diseño y construcción de un sistema de automatización implementado en el prototipo. La metodología que se utilizó consiste en un análisis funcional y una división modular del proceso completo. Una investigación de campo por medio de encuestas a los productores de quesos y leche para una obtención de información de la voz del cliente, fueron una base para el desarrollo del presente sistema. Se realizó el diseño del sistema de automatización por medio de diagramas de flujo y graficet para ser llevados a la programación en Ladder. Con esto se realizó el diseño del tablero de control del sistema, su ensamblaje, para proceder a pruebas de calibración y validación. Los resultados de este proyecto reflejaron que el sistema de automatización ayudó en la producción con la reducción de tiempos de fabricación al tener una secuencia del proceso controlada sin tener un paro durante un proceso continuo. Evitando el contacto del operario y materia prima.

Palabras claves: automatización, Ladder, graficet, quesos.

I. INTRODUCTION

La elaboración de quesos maduros que realizan las microempresas artesanales de Ecuador resulta insuficiente en cuanto a calidad, bajos niveles de higiene y de tecnificación, por cuanto no poseen las maquinarias que integren los diferentes procesos tanto en la preparación como en la extracción de suero.

Se requiere entonces de un perfeccionamiento en los procesos y una integración directa en una línea de producción de forma horizontal que abarque todos los procesos con una sincronización entre ellos.

Según los datos del sistema estadístico agropecuario nacional en el norte del Ecuador produce aproximadamente 745000 litros de leche por día, donde Carchi e Imbabura son las principales provincias productoras, de esta cifra el 80 % se destina a la elaboración de productos lácteos, el 20% restante se destina al uso artesanal en la elaboración de quesos y alimentación en la finca. [1]

Actualmente, la elaboración de quesos maduros en las microempresas se realiza de una forma manual con un alto grado de desgaste físico en los trabajadores, contaminando el

producto en los procesos de corte y de pre-prensado. Existen bajos niveles de higiene en los procesos antes mencionados ya que en estos lugares no se realiza un control en la manipulación de la materia prima del producto.

La restricción de documentación técnica y los altos costos de líneas comerciales representan un limitante en el desarrollo tecnológico para el cambio de la matriz productiva.

Ante esta problemática la Universidad Técnica del Norte a través de la facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas y la Carrera de Ingeniería Mecatrónica se encuentra implementando un prototipo de línea para la producción de quesos, este proyecto pretende implementar el sistema de automatización del prototipo. Se tomó en cuenta las normas sanitarias (NTE INEN 2604, NTE INEN 1528) permitiendo mejorar la calidad y con intervención mínima del trabajador en operaciones delicadas (corte y pre-prensado) en la elaboración de este producto. Dando solución a los problemas de desperdicios de materia prima, bajo nivel de higiene, tiempo de elaboración y duración del producto. El sistema de control de la línea tendrá como parámetro configurable la cantidad de leche a ser procesada.

En Ecuador se han generado políticas con el fin de realizar una transformación de la matriz productiva para alcanzar el buen vivir. El país se ha caracterizado por la producción de bienes primarios con poca o nula tecnificación en ese caso en la elaboración de quesos. Para solucionar este problema se han desarrollado sistemas. Por ejemplo, en el ámbito de las microempresas artesanales según las encuestas realizadas y las visitas realizadas se pudo observar que, emplean una marmita o cocina industrial para la preparación, llevando la leche a una temperatura aproximada 33° C, el operario introduce su mano para saber si la leche está en la temperatura ideal sin emplear un termómetro. Los procesos de Corte de cuajada, extracción de suero, moldeo y prensado son realizados manualmente por los operarios con utensilios no adecuados. En industrias que ya cuentan con una mayor tecnificación emplean métodos y equipos; como marmitas o calderas en las cuales se realiza el proceso de pasteurización y preparación, dichos equipos son construidos en acero inoxidable, con distintas capacidades que van desde los 500 litros hasta los 5000, se adaptan a diferentes tipos de medios de calefacción: electricidad, gas, gasóleo de calefacción, vapor, agua sobrecalentada en circuito cerrado. Estos dispositivos ya tienen controles, puede ser mediante un PLC, un pirómetro, entre otros. Con un agitador de diferentes tipos de paletas para realizar el proceso de corte de cuajada con

un motor AC. En el proceso de pre-prensado y prensado se utiliza una prensa neumática de quesos, su construcción en acero inoxidable, dotada de pistones neumáticos, con una malla en los lados de la mesa que facilita la extracción del suero de la cuajada. Otra opción encontrada es una prensa con una capacidad que varía según sus dimensiones, con una palanca y un tornillo sin fin cromado, una mesa inoxidable y un colector de suero, se puede prensar diferentes números de moldes por piso de acuerdo con la configuración de la prensa.

En procesos automatizados se encontraron soluciones como: [2] Diseñó un sistema de pasteurización de leche, este sistema realiza el control mediante un PLC que controla el paso del gas, activa una bomba de circulación de agua, realiza el censo de la temperatura mediante un sensor pt100 y activa un motor monofásico. Este sistema no cuenta con un mecanismo que facilite la extracción de la cuajada ya que cuenta con una cantidad considerable; además, que no se menciona cuál es la capacidad máxima, [3] En la Universidad Técnica del Norte realizó un sistema semiautomático de mezclado de leche y corte de la cuajada para una cuba quesera de 500 litros que manejó un variador de frecuencia para realizar el corte de la cuajada y un sensor de temperatura; el autor no especificó parámetros del sistema de control empleado, No se menciona si el sistema cuenta o no con un mecanismo que facilite la extracción de la cuajada. [4] Diseñaron y Construyeron una marmita Automatizada para la elaboración de quesos en la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo. Las características son: con un volumen máximo de 122 litros, una temperatura de pasteurización de 70° C la adición de cuajo la realizan a 38° C, emplearon un variador de frecuencia con un motor para mezcla, no se mencionó parámetros del sistema de control empleado y finalmente este sistema no cuenta con un mecanismo que facilite la extracción de la cuajada. En el ámbito internacional se encontró [5] Desarrollaron un control en línea del proceso de elaboración de queso mediante sensores de fibra óptica, Universidad De Antioquia. Usaron sensores de fibra óptica para medir la dispersión de luz de infrarrojo como resultado un método objetivo y preciso para controlar el proceso de coagulación de la leche durante la elaboración del queso el cual permitió obtener modelos apropiados para la predicción de parámetros como el tiempo de coagulación y el tiempo de corte de la cuajada.

La principal causa de la escasa calidad en la producción de quesos maduros es atribuible debido a las condiciones y métodos de manipulación de parte de los operarios en el proceso de elaboración.

II. IMPORTANCIA DEL PROBLEMA.

El proceso de elaboración de quesos de forma artesanal es lento y en ciertos puntos se tienen bajos niveles de higiene. Dichos procesos carecen de una automatización. Debido a sus altos precios que limitan realizar importaciones de estos tipos de máquinas, por lo tanto, los artesanos que requieren estos equipos necesitan suficientes recursos económicos para acceder a una línea automatizada. Por estos motivos se desarrolla un prototipo con que se pretende mejorar los tiempos de producción y aumentar la calidad del producto. Toda la

automatización ejecutada en esta línea encamina a una industrialización del mismo con reducción de costos, lo que provocará un aumento inevitable de las utilidades del artesano, beneficiando a la zona 1.

III. METODOLOGÍA

Los pasos o métodos por seguir para aplicar la metodología son: Características del usuario. Análisis funcional, división modular, descripción del sistema, diagrama de flujo, descripción de los dispositivos, selección del controlador lógico, programación del PLC, modelación matemática de temperatura, Regla de sintonización de Ziegler Nichols, Diseño del tablero de control, Cálculo de calibre de cables y cálculo de protecciones.

A. Características del usuario.

Después de realizar las respectivas encuestas a los productores de quesos y de leche, se obtuvo que los productores artesanales de quesos dieron una aceptación hacia una automatización en el proceso sería de gran ayuda a aumentar los niveles de producción con intervención mínima del trabajador en operaciones delicadas como corte y pre-prensado, por lo tanto, la información brindada es de gran ayuda para el desarrollo de este prototipo. Las respuestas de los productores y recolectores de leche nos indican que existe una mayor rentabilidad elaborando quesos que a la venta de leche cruda sin procesar, por lo tanto, estarían dispuestos a realizar una inversión para obtener un prototipo de elaboración de quesos.

B. Análisis funcional.

El análisis funcional es la identificación, mediante el desglose o desagregación, y el ordenamiento lógico de las funciones productivas que se llevan a cabo en el proceso, se aplica de lo general a lo particular según el nivel en el cual se esté desarrollando el análisis. Esta técnica propuesta por el ingeniero estadounidense Lawrence D. Miles, cuyo propósito es el de separar la acción que se efectúa del proceso, de este modo buscar nuevas soluciones a un mismo problema. El análisis funcional logra obtener mejores productos a un menor costo.[6]. Al aplicar esta técnica en la resolución de un problema, es necesario subdividir claramente las funciones primarias y subfunciones secundarias en funciones que son necesarias para realizar cada subfunción del producto. En este caso es la de elaborar quesos. Las secundarias son aquellas que permitan que la función primaria se desarrolle. [7]. Una vez determinadas todas las funciones secundarias o subfunciones se procede a plantear soluciones aptas para resolver estas funciones, para luego seleccionar aquellas que se adapten a la mejor solución. Estas funciones pueden ser agrupadas para obtener módulos que sean capaces de cumplir un conjunto de funciones secundarias, obteniéndose así un diseño modular. [6].

El desglose funcional del proceso se lo lleva a cabo mediante diagramas de flujo que aparece cada función, en los cuales se puede tener 3 tipos de entradas y salidas: control, material y

energía. Los diagramas de flujo se presentan en diferentes niveles, comenzando con el nivel 0 o función global, y continuando hasta el nivel que sea conveniente. [7]

C. Definición de módulos

El modularidad consiste en dividir al producto en varios bloques (módulos) funcionales o constructivos. El diseño de productos tomando en cuenta el modularidad ayuda enormemente en varios aspectos tales como la reducción de costos, el nivel de automatización a realizarse, la facilidad de mantenimiento, y facilidad de producción. [7]

Debido a que dentro del proceso de elaboración de quesos se cumplen varias funciones, resulta conveniente llevar a cabo una división modular. Para esto se analiza cuidadosamente los diagramas funcionales en la figura 1 para establecer la división modular más apropiada tomando en cuenta las interfaces de los flujos energéticos, de material y de señal. [7]

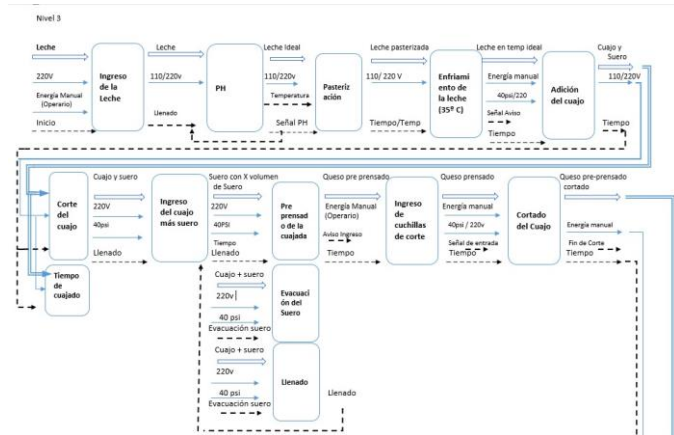


Fig 1 Análisis Funcional del proceso.

Al estudiar el diagrama funcional se pueden establecer cuatro conjuntos principales de funciones:

- El ingreso de la leche que va desde la función del ingreso de materia prima hasta el censado del pH permitido.
- Pasterización y el enfriamiento. En este módulo tienen una relación de señales y energía.
- En la preparación va desde la adición del cuajo hasta el tiempo total de cuajado igualmente con una relación de sus señales.
- La extracción del suero en este proceso va desde el ingreso del cuajo más suero a la zaranda, continuando con el pre prensado y la evacuación del suero llegando hasta el corte de la cuajada por medio de cuchillas.

Esta primera división se ha efectuado por la relativa dependencia con la que operan estos cuatro conjuntos de funciones. El primero de estos conjuntos se encarga del ingreso la materia prima a la máquina.

El segundo tiene la tarea de pasterización y llegar a la temperatura correcta. El tercer proceso es el de preparación con la adición del cuajo. Se considera que existe dependencia entre estos conjuntos ya que existe una interfaz de flujo de material, lo que, en otras palabras, significa que estos procesos no pueden

operar con separados. En cuanto al cuarto proceso existe una independencia con los anteriores procesos por lo que puede desarrollarse la extracción del suero y el pre prensado sin interacción del proceso de preparación.

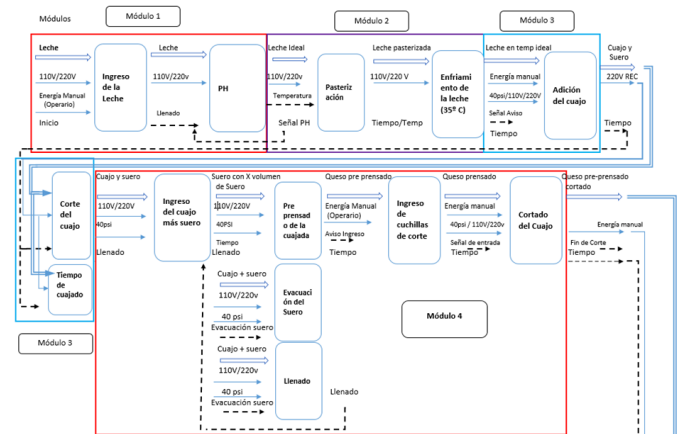


Fig 2 División Modular (módulos del proceso de elaboración)

D. Descripción del Sistema

En el desarrollo de la elaboración de quesos maduros existen dos puntos primordiales como son la preparación, la extracción del suero y maduración. En los cuales existen diversos dispositivos que intervienen en el proceso. Por lo tanto, la necesidad de una descripción detallada de cada uno de los pasos del proceso.

E. Diagrama de flujo.

En el diagrama de flujo es una representación gráfica de los pasos en el proceso. Dicho diagrama es útil para determinar cómo funciona realmente el proceso. El diagrama se utiliza en gran parte de las fases del proceso para una mejora continua, sobre todo en diseño e implantación de soluciones y procedimientos del proceso. [8]

F. Descripción de los equipos del sistema

En el sistema se emplean diferentes dispositivos los cuales fueron explicados en el análisis funcional y el análisis modular con sus correspondientes agrupaciones según su interrelación tanto en sus entradas como en sus salidas.

G. Selección del PLC

En la Automatización del prototipo de línea de producción de queso, este proyecto tiene fin llegar a una industrialización del proceso antes mencionado partiremos en emplear como controlador un autómata programable o conocidos como PLC. La determinación de entradas y salidas requeridas en el sistema es típicamente la característica principal en la selección de un controlador contar con un número amplio de entradas y salidas tanto digitales como analógicas (señales de tensión o corriente, pulsos de 0/5 V, 0/24 V, tensiones alternas 110 V, 220 V, tensiones continuas 12/24/48 V, etc.), llegando a manejar

múltiples equipos de una manera simultánea (sensores, actuadores etc..), con un control más preciso del proceso dependiendo la marca y configuración de estos equipos, brindan una mayor velocidad de respuesta, flexibilidad en su programación, dependiendo de la aplicación se puede emplear módulos de expansión para aplicaciones más específicas, podemos emplear HMI dependiendo del fabricante una opción de visualización y de relación con el operario Son algunas de las características que se tomaron en cuenta al momento de seleccionar un PLC por lo tanto la selección de este dispositivo. [9]. Una matriz de selección con una valoración de 5 puntos de acuerdo a las ventajas desventajas señaladas de las diferentes alternativas en los incisos(Costo del equipo, costo del software, capacidad de expansión, intercomunicación HMI, capacidad de ampliación, mínimas entradas y salidas, uso de fuentes externa), se tomó en cuenta los datos obtenidos en la matriz de decisión y considerando las necesidades de este prototipo, se puede determinar que la alternativa más óptima y viable para el caso presentado, y para las características señaladas de entradas y salidas, se utilizará un PLC XC3- 24RT-E de 24 I/O XINJE por las características antes mencionadas.

H. Programación del PLC

Existen dos formas de programación para el PLC: El método heurístico o informal (función memoria) y el método formal (GRAFSET), El método grafset es el que mejor se acopla a nuestra automatización por lo tanto es el método por usar. Primero para realizar el diagrama, el cual consiste en un diagrama gráfico de etapas y transiciones, por medio del cual se puede llevar a cabo con facilidad la programación del PLC elegido de acuerdo con el software del mismo. [8]

De acuerdo con el diagrama del GRAFCET se describen las entradas y salidas que intervienen en el programa para tener una mejor visualización del mismo. Esto ayuda en mayor parte para la siguiente etapa que se refiere a la programación del PLC.

Se debe tener en cuenta realizar un diagrama de ambiente con las entradas las cuales entregan la información necesaria para que el sistema de control inicie el proceso y por ende brinde salidas del sistema de control que maneja o controle el PLC.

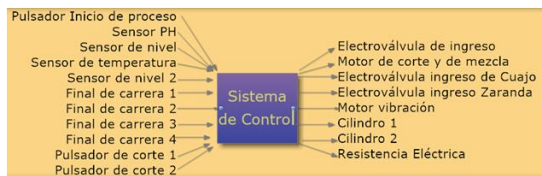


Fig 3 Diagrama de ambiente (Esquema del sistema de control)

I. Diagrama GRAFCET

De acuerdo con el diagrama del GRAFCET se describen las entradas y salidas que intervienen en el programa para tener una mejor visualización del mismo. Esto ayuda en mayor parte para la siguiente etapa que se refiere a la programación del PLC. En la figura 4 de puede apreciar el diagrama grafset desarrollado del prototipo.

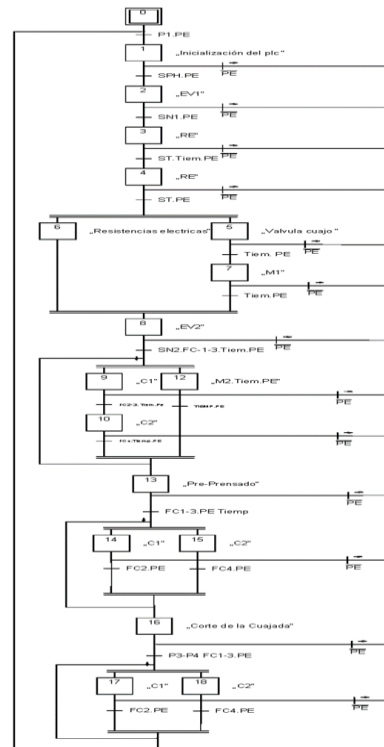


Fig 4 Diagrama Grafcet del proceso

J. Programación en el software xcpro

Una vez realizada la selección del PLC y como mejor alternativa se tiene el PLC Xinje XC3- 24RT-E de 24 I/O emplearemos el software xcpro versión 3.3 gratuito, El lenguaje de dicho software es el Ladder o programación gráfica muy popular dentro de los autómatas programables. Para la parte de la interface humano-maquina (HMI) empleamos un panel operador de 4 líneas monocromático con el software OP20 TOOL con un lenguaje grafico de programación con comunicación con el PLC. En nuestro programa se tomaron como base tres etapas que se detallan a continuación.

K. Adquisición de Datos.

Lectura de las señales de los diferentes sensores distribuidos por todo el prototipo como por ejemplo los sensores de PH, temperatura, llenado del tanque, zaranda y finales de carrera.

L. Control

Desarrollar acciones de control o de mando del sistema enviadas desde el PLC hacia los accionadores y preaccionadores del prototipo.

M. Dialogo Hombre maquina

Mantener una comunicación con el operario del proceso, obedeciendo sus órdenes e informando del estado del proceso. Para esta etapa se cuenta con un panel operador en el cual se mantendrá informado al operario del estado del proceso también con señales luminosas en diferentes puntos críticos del sistema.

N. Modelación matemática de la parte de temperatura

En cuanto a la modelación matemática de la parte de temperatura de preparación, se empleó el método de adquisición de datos. Básicamente el modelo es una herramienta que permite predecir el comportamiento de nuestro proceso.

O. Adquisición de Datos

En cuanto a la toma de datos empleamos una tarjeta de adquisición (NI MYDAQ). Esta tarjeta realiza un censo y un almacenamiento en un archivo .xlsx, con un sensor de temperatura PT100 y una niquelina a ser utilizados en el proceso. Los datos adquiridos a ser usados en la modelación son: la señal de entrada la temperatura obtenida mediante el acondicionador de señal del sensor de temperatura (Voltaje del acondicionador 0-10V) y Señal de salida el voltaje de la tarjeta hacia el relé de estado sólido (Voltaje de salida de 0-10V) los dos valores almacenados en el archivo .xlsx para realizar la modelación de la planta.

P. Modelación de los Datos.

La parte de manejo de los datos la realizamos en el software MATLAB con su herramienta ident para la construcción del modelo matemático del sistema a partir de datos de entrada-salida (Voltaje-Voltaje del acondicionador). Utilizando los datos en dominio de tiempo para identificar la función de transferencia. La herramienta también proporciona algoritmos para la estimación de diferentes parámetros y la reducción al mínimo de predicción de errores.

Con un tiempo de muestreo de 100ms y los datos obtenidos mediante la tarjeta de adquisición de datos (MyDAQ) se los llevó al software Matlab y su herramienta ident obteniendo la función de transferencia que rige la relación entre la entrada de 10V a la niquelina con su respectivo circuito de potencia y una retroalimentación mediante el sensor pt100 con su acondicionador de señal de 0-10v con un rango de -50 oC a 100 oC se obtuvo una función de nuestro sistema con un porcentaje de aceptación de 95.17%.

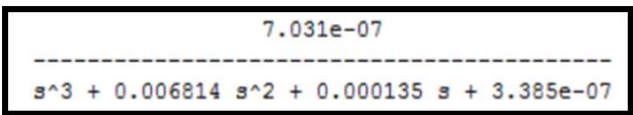


Fig 3 Función de transferencia (Datos obtenidos después de aplicar el comando ident de Matlab)

Q. Sintonización del controlador.

Una vez encontrada la función de transferencia de nuestra planta se seleccionó emplear un controlador PID. El controlador es realimentado, el propósito de la parte proporcional es acelerar la respuesta de nuestro sistema produciendo un offset o error de estado estacionario, mediante el uso de una acción integral se logra disminuir y eliminar dicho offset provocado por la acción proporcional. La parte derivativa del controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro con un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

Para la sintonización del controlador se utilizará las Reglas

de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID. Ziegler y Nichols propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , con base en las características de respuesta transitoria de una planta específica.

R. Regla de sintonización de Ziegler – Nichols

El controlador PID tiene la función de transferencia.

Ecuación 1 Función de transferencia controlador PID [6]

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Aplicando una regla de sintonización de Ziegler-Nichols para la determinación de los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d .

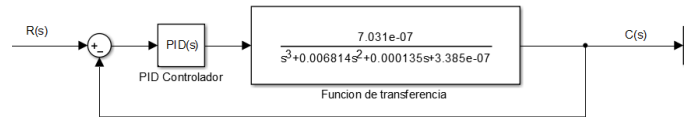


Fig 4 Sistema con un controlador PID

Paso 1. Estableciendo $T_i = \infty$ y $T_d = 0$, obtenemos la función de transferencia en lazo cerrado del modo siguiente:

Ecuación 2 Función de transferencia en lazo cerrado

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{7.031e^{-7} \cdot K_p}{s^3 + 0.006814s^2 + 0.000135s + 3.385e^{-7} + 7.031e^{-7} \cdot K_p}$$

Paso 2. El valor de K_p que hace al sistema marginalmente estable para que ocurra una oscilación sostenida se obtiene mediante el criterio de estabilidad de Routh. Dado que la ecuación característica para el sistema en lazo cerrado es:

Ecuación 3 Ecuación característica para el sistema en lazo cerrado

$$s^3 + 0.006814s^2 + 0.000135s + 3.385e^{-7} + 7.031e^{-7} \cdot K_p = 0$$

El arreglo de Routh se convierte en:

$$\begin{array}{l} S^3 \quad 1 \quad 0.000135 \\ S^2 \quad 0.006814 \quad 3.385e^{-7} + 7.031e^{-7} \cdot K_p \\ S^1 \quad \frac{(0.006814 \times 0.000135) - (1 \times 3.385e^{-7} + 7.031e^{-7} \cdot K_p)}{0.006814} \\ S^0 \end{array}$$

Paso 3. Examinando los coeficientes de la primera columna del arreglo de Routh, encontramos que ocurrirá una oscilación sostenida si $K_p = 0.8268951785$. Por tanto, la ganancia crítica K_{cr} es: $K_{cr} = 0.8268951785$

Con la ganancia K_p establecida igual a $K_{cr} = 0.8268951785$ la ecuación característica se vuelve:

$$s^3 + 0.006814s^2 + 0.000135s + 0.8268951785 = 0$$

Paso 4. Para encontrar la frecuencia de la oscilación sostenida, sustituimos $s = j\omega$ en la ecuación característica, del modo siguiente:

$$\begin{aligned}
 jw^3 + 0.006814jw^2 + 0.000135jw + 0.8268951785 &= 0 \\
 0.006814jw^2 + 0.8268951785 &= 0 \\
 0.006814jw^2 &= -0.8268951785 \\
 jw^2 &= -\frac{0.8268951785}{0.006814} \\
 w &= 11.0160 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Paso 5. A partir de lo cual encontramos que la frecuencia de la oscilación sostenida es $w=11.0160$ Así, el periodo de la oscilación sostenida es:

$$Pcr = \frac{2 \cdot \pi}{w} = 0.57036860$$

Paso 6. Determinamos los valores de Kp , Ti , Td del modo siguiente:

$$\begin{aligned}
 Kp &= 0.6Kcr = 0.496137 \\
 Ti &= 0.5Pcr = 0.285184 \\
 Td &= 0.125Pcr = 0.35124
 \end{aligned}$$

Paso 7 Sustituimos los valores en la función de transferencia del controlador ecuación 1:

$$\begin{aligned}
 Gc(s) &= Kp \left(1 + \frac{1}{Ti s} + Td s \right) \\
 Gc(s) &= 0.4961 \left(1 + \frac{1}{0.28518s} + 0.07129s \right) \\
 Gc(s) &= \frac{0.035366969s^2 + 0.141477s + 0.4961}{0.2851s}
 \end{aligned}$$

La función de transferencia en lazo cerrado $C(s)/R(s)$ se obtiene mediante la figura 5.

Ecuación 4 Función de transferencia lazo cerrado aplicado un PID teórico.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{7.09143e^{-9}s^2 + 3.48807e^{-8}s + 9.9472e^{-7}}{0.2851s^4 + 1.9426714e^{-3}s^3 + 3.84885e^{-5}s^2 + 9.65e^{-8}s}$$

La cantidad sobrepaso máximo es excesiva. Se reducen los parámetros del controlador mediante un sintonizado fino. Dicha sintonización se hace en software de ingeniería reduciendo los valores referenciales de Kp , Ti Y Td , Después de haber reducido los valores referenciales con la ayuda del software Matlab y su herramienta Simulink se encontró la siguiente respuesta de le figura.

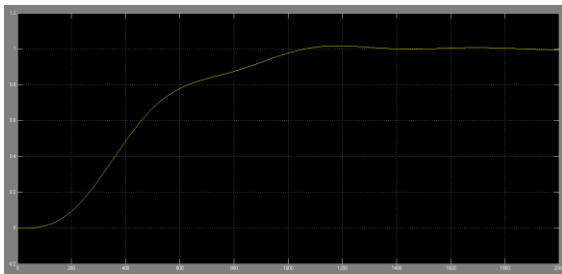


Fig 7 Respuesta después de aplicar el controlador PID

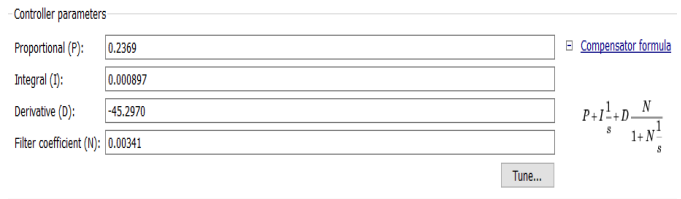


Fig 8 Valores del controlador sintonizado mediante Matlab.

Al realizar una breve comparación entre la función de transferencia de la planta como se observa en la figura 9 y la función de transferencia aplicada un controlador PID sintonizado mostrada en la figura 10 se encuentran grandes diferencias, como el tiempo de levantamiento que es el requerido para que la respuesta llegue a un 95% de su valor final.

Diferencias significativas en los valores de los tiempos de levantamiento y de asentamiento, se aprecia que los tiempos son menores y dan un mejor rendimiento en la función de transferencia con un controlador PID. Con un sobre paso menor al de la función de transferencia figura 9 indica que con una ganancia menor se puede llegar a estabilizar más rápido observado en la figura 10 y sin sobre picos en la respuesta por lo tanto se tienen mejores resultados con un controlador PID.

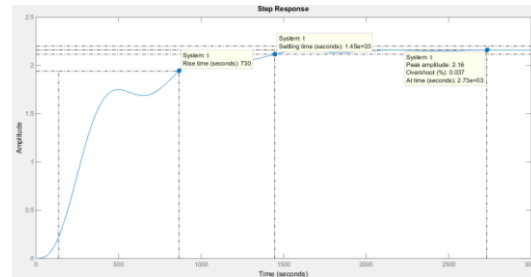


Fig 9 Características de la función de transferencia sin el controlador PID

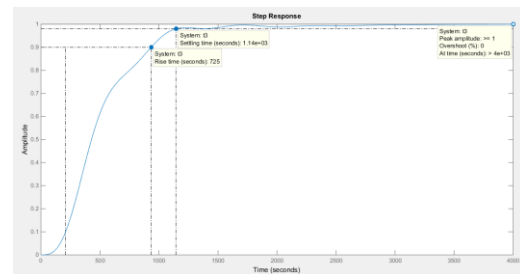


Fig 10 Características de la función de transferencia aplicada un control PID

S. Diseño del tablero de control.

Para el diseño del tablero de control se partió con medidas estándar del mercado, al existir una amplia gama de medidas partimos de $60 \times 40 \times 20$ cm estas medidas encontradas con mayor facilidad y llevadas al software de diseño mecánico en el cual ensamblamos los dispositivos con medidas reales nos dan una idea del tablero final. Finalizado el ensamblaje se obtiene que las medidas son suficientes.

1) Panel Frontal

Para el panel frontal se tomó en cuenta características y recomendaciones las cuales faciliten la interacción del usuario y el sistema. Se consideró diferentes niveles partiendo de un primer nivel desde un interruptor de encendido que energiza todos los dispositivos del tablero de control, como segundo nivel se consideró el HMI en la parte superior central lo que permita al operario tener un mayor campo de visión de ella, una tercera disposición se tienen a las señales luminosas las cuales permiten observar que proceso se está desarrollando o el dispositivo que está en funcionamiento, A continuación, se dispuso de un paro de emergencia el cual este en un lugar de fácil y rápida operación. Finalmente se dispuso de los dos pulsadores colocados al final del panel frontal con la finalidad de que el operario emplee sus dos manos para dicha operación. En la figura 11 se puede apreciar un modelo del panel frontal planteado.



Fig 5 Panel frontal del Tablero de control

2) Panel Interno

En dicho panel se tuvo varias consideraciones en la colocación de los dispositivos una disposición jerárquica. En la parte superior se tiene las protecciones de alimentación, borneras de alimentación y fuente de poder. A continuación, la parte principal del tablero le control en este caso lleva acabo el PLC el responsable de que todo el proceso se lleve a cabo. Finalmente se dispuso dispositivos de accionamiento, acondicionamiento, sensado y borneras las cuales tienen las conexiones exteriores al tablero. En la figura 12 se puede apreciar la propuesta de panel interno del tablero.

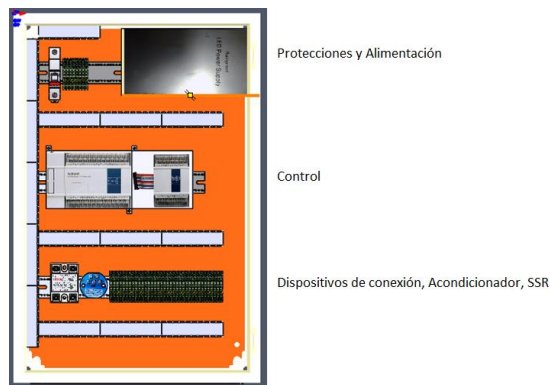


Fig 6 Panel interno del Tablero de control

T. Cálculo para la selección de cables

Para la parte de la selección de cables se tomará en cuenta la potencia y alimentación desde un tomacorriente alterno de 120v/60Hz se alimentará a Fuente de poder de 24v/5A, un PLC, una niquelina de 1000w. En la tabla siguiente se indica la cantidad máxima de corriente que soportan los cables, por lo tanto, se realizó una comparación entre en calibre 16 AWG que soporta 8 amperios y el conductor 14 con una capacidad máxima de corriente de 20 por lo tanto la selección es el de calibre 14. Para el cableado interno se tomó en cuenta la corriente de la fuente que es igual a 5 A como resultado se seleccionó el calibre número 16AWG.

Tabla 1 Consumo de potencia de los elementos

Elemento	Potencia	Corriente
Fuente 24V/5A	120W/120V	1 a
Niquelina	1000/120V	8.33 A
PLC	12W/120V	0.1 A
Total:		9.43 A

Tabla 2 Tabla de características de cables awg y selección calibre 14-16

TIPO	CALIBRE	CONDUCTOR				AISLAMIENTO			PESO TOTAL APROX	CAPACIDAD CORRIENTE			
		# H	DIÁMETRO		PESO APROX	ESP PROM	DIAM APROX	PESO APROX		Kg/Km	Kg/Km	Amp	Amp
			HILO	COND									
TF	18	1	1.02	1.02	7.32	0.76	2.54	5.96	13.28	6	7		
TF	16	1	1.29	1.29	11.62	0.76	2.81	6.85	18.47	8	10		
TWS	14	1	1.63	1.63	18.51	0.76	3.15	7.98	26.49	20	25		
TWS	12	1	2.05	2.05	29.40	0.76	3.57	9.40	38.80	25	30		
TWS	10	1	2.59	2.59	46.76	0.76	4.11	11.19	57.96	30	40		
TWS	8	1	3.26	3.26	74.39	1.14	5.54	22.08	96.47	40	60		
TWS	6	1	4.12	4.12	118.23	1.14	6.40	26.35	144.58	55	80		
TWC	8	7	1.23	3.70	75.91	1.14	5.98	27.10	103.01	41	62		
TWC	6	7	1.55	4.66	120.39	1.52	7.70	45.80	166.19	57	82		
TWC	4	7	1.96	5.88	191.71	1.52	8.92	56.61	248.32	70	105		
TWC	2	7	2.47	7.42	305.13	1.52	10.46	71.12	376.25	95	140		
TWC	1/0	19	1.89	9.46	484.38	2.03	13.52	115.10	599.48	125	195		
TWC	2/0	19	2.13	10.63	611.61	2.03	14.69	128.83	740.44	145	225		
TWC	3/0	19	2.39	11.94	771.64	2.03	16.00	144.66	916.30	165	260		
TWC	4/0	19	2.68	13.40	971.89	2.03	17.46	162.87	1.134.76	195	300		

U. Cálculo de protecciones.

Para el cálculo de protecciones se toma en cuenta el consumo máximo de corriente de cada uno de los elementos de la tabla 1. Y la intensidad nominal como constante igual a 1.5. Ecuación 5 Formula de cálculo de protecciones.

$$Proteccion = 9.43A \times 1.5 = 14.15A$$

El valor obtenido fue de 14.15 A en el mercado se encontró un disyuntor contra sobre cargas de 16 A.

IV. RESULTADOS

Se obtiene un tablero de control con las características antes mencionadas en la parte del diseño, con las medidas del mercado de 60cm de altura, 40 cm de ancho y 20cm de profundidad. Con la disposición de los dispositivos antes mencionadas del panel frontal el cual permite la visualización del desarrollo del proceso figura 13. La parte interna se tiene las protecciones, control (plc) y borneras de conexión en la figura 14 se aprecia la parte interna del tablero



Fig 7 Panel frontal del tablero de control



Fig 14 Panel interno del tablero de control

A. PH

La parte del sensado se lo llevara cabo con un sensor de pH, nos da una salida tipo analógica con un rango de medición de 0-10v correspondientes a valores de 2 – 12 pH, dichos valores medidos son adquiridos por el PLC y analizados. Dicho análisis dentro de un rango de 6.5 a 6.8 son los valores mínimos y máximos, dentro de ese rango la materia prima puede ser empleada para la elaboración de quesos. La medición es mostrada en la pantalla del HMI una vez realizada una conversión análogo-digital para la presentación del valor de pH.

En la conversión se tiene un valor digital de 16383 correspondiente a los valores máximos analógicos de entrada 10v.

B. Ingreso Materia Prima

En el ingreso de materia prima el tanque de preparación posterior al sensado de pH de la misma manera se empleó un sensor analógico con un control de llenado máximo del tanque, de acuerdo con la disposición de la cantidad de materia prima se empleó una opción manual en la programación el PLC se da un modo dinámico de cantidad diferente de leche. Para este proceso no se realizó una conversión análogo digital en la pantalla muestra directamente un valor digital que da referencia al nivel del tanque.

C. Pasteurización

El siguiente proceso después de llenarse el tanque se procese a una pasteurización por lotes o lenta la cual se tiene como temperatura mínima 62° C y máxima los 65° C. En este Proceso se tiene un tiempo de 30 minutos de acuerdo con la norma NTE INEN 0010 la cual especifica el tiempo y temperatura, en las pruebas realizadas aplicando el controlador PID se observa que se mantiene dentro de los rangos propuestos con pequeñas variaciones de temperatura por ejemplo 66. 4° C un valor máximo el cual es aceptable en el prototipo aceptable.

D. Preparación.

Mediante un enfriamiento natural una vez completado el proceso de pasteurización y de acuerdo con las características del cuajo, como temperatura promedio de adición 35-37° C, un tiempo de cuajado o de preparación de 40 minutos. La adición de cuajo se realizó mediante una electroválvula, La mezcla y corte son realizados mediante un motor con un mecanismo adecuado para este proceso. Igualmente, que el procedimiento anterior se tiene un control de temperatura mediante el control PID por parte del PLC.

E. Llenado de la Zaranda

Una vez terminada la preparación la mezcla será llevada a la zaranda, el paso de la mezcla es controlado por medio de una electroválvula la cual cierra su paso una vez que el sensor analógico de nivel detecta la cantidad máxima. Se dispuso mediante la programación de dos tipos de llenado, Uno normal alcanzando los niveles máximos de dicha zaranda, Y un llenado el cual el operario selecciona para continuar al proceso con una cantidad diferente a la máxima establecida.

F. Extracción de Suero

Para la extracción del suero de la mezcla se empleó un motor para el procedimiento de vibración y dos cilindros neumáticos los cuales con la secuencia +A, -A, +B, -B se logró una mayor extracción de suero con la combinación de los dos mecanismos.

G. Pre-Prensado.

Los procesos de extracción y pre prensado son usados para separar el excedente de suero de la cuajada, Para el pre prensado solo empleamos los cilindros, desactivando el motor de vibración. La secuencia de los actuadores es +A.+A, -B, -B.

H. Corte.

En el proceso de corte empleando el mismo mecanismo, al operario se le indicada con una señal luminosa el cambio de las cuchillas de corte. Una vez realizado el cambio por las cuchillas se presentan dos pulsadores P1-P2 para realizar el corte.

I. Controlador PID

Del controlador planteado y al realizar varias pruebas partiendo de los valores teóricos obtenidos se tuvieron los siguientes resultados

J. Valores Teóricos

Al implementar los valores teóricos en el PID del plc se obtuvo un pico máximo de 72° C, con un tiempo de estabilización 6 minutos por lo tanto en base a estos resultados se plantea una nueva sintonización del controlador PID partiendo de los valores teóricos. En la parte de preparación con una temperatura menor no tubo errores como en la pasteurización con un pico máximo de 36. 8° C.

K. Calibración PID.

Al realizar una nueva calibración en el controlador PID del PLC con valores recomendados por el fabricante del PLC de acuerdo con procesos térmicos y teniendo en cuenta el controlador teórico de las reglas de sintonización de Ziegler Nichols se encontraron los valores.

Con la calibración y los nuevos se obtuvo un pico máximo de 66. 5° C el cual es menor al pico teórico obtenido y un tiempo de estabilización de 2 minutos. El controlador PID con el pico máximo y tiempo de estabilización menor es aceptable para este proceso en el cual se tiene un rango máximo de temperatura de 65° C según la norma NTE INEN 0010 por lo tanto se establecieron como valores definitivos del controlador.

V. CONCLUSIONES

Como resultado de esta investigación presentada, es posible concluir que los factores que influyen en la calidad de la mezcla de la preparación son: La temperatura ideal en este caso la de pasteurización de 62-65° C, con una diferencia máxima obtenida de 0 49° C grados entre mediciones en un rango de medición de 3° C por lo tanto esta variación no afecta en el proceso. En la adición de cuajo es de 35° C dicho valor es dado por el fabricante del agente coagulante el que se debe tener muy en cuenta en el momento de la programación y calibración, La cantidad de cuajo hacer adicionada de acuerdo con el volumen de materia prima se determinó como un factor de gran impacto en la preparación. Otro factor muy importante es el tiempo de pasteurización 30 min, tiempo de mezcla 35 min y corte de la cuajada en estos casos el tiempo que indica el fabricante del cuajo o en base a la normativa de esta actividad.

La programación desarrollada en base al diagrama grafcet con secuencias de tiempos entre los procesos de preparación, extracción de suero, pre-prensado y corte. Implementada en el PLC influyo en la automatización del prototipo con una

producción continua, eficiente y una intervención mínima del operario.

Un tablero de control en el cual abarcan características que faciliten la interacción humana maquina con una pantalla y señales luminosas. En dicho tablero se implementó el sistema de automatización con los dispositivos de control.

Se realizaron pruebas y calibraciones de acuerdo con normas como es la NTE INEN 0009 para manejo de leche cruda y la norma NTE INEN 0010 de acuerdo con características pasteurización.

VI. REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «INEC,» 2011. [En línea]. Available: http://www.inec.gob.ec/espac_publicaciones/espac-2011/INFORME_EJECUTIVO%202011.pdf. [Último acceso: 16 Junio 2016].
- [2] D. A. Pilicita Escobar, Diseño y construcción de un equipo para la pasteurización de leche, Quito , 2013.
- [3] P. R. Robles Ponce, «Sistema semiautomático de mezclado de leche y corte de la cuajada para una cuba quesera de 500 litros en las Unidades Productivas de la FICAYA,» 2013. [En línea]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/3521?mode=full>.
- [4] Erazo Catillo Susana Alexandra, Lata Morocho Martha Veronica, Diseño y construcción de un amarmita automatizada para la elaboración de queso, Riobamba , 2012.
- [5] Arango Oscar, Castillo Manuel, Osorio Oswaldo., «Control en línea del proceso de elaboración de Quesos,» vol. 19, 2012.
- [6] L. D. MILES, Techniques of Value Analysis and Engineering., USA: Miles Value Foundation;, 1989.
- [7] D. A. C. PONCE, DISEÑO DE UNA MÁQUINA SEMIAUTOMÁTICA PARA LA, Quito, 2011.
- [8] José Guadalupe Castro Lugo, Juan José Padilla Ybarra, Eduardo Romero A., «Metodología para realizar una automatización,» *IMPULSO, REVISTA DE ELECTRÓNICA, ELÉCTRICA Y SISTEMAS COMPUTACIONALES*, pp. 18-21, 2005.
- [9] E. J. Macías, Técnicas de automatización avanzadas en procesos industriales, 2004.
- [10] K. Ogata, Modern Control Engineering, Boston: Pearson Education, 2010.