



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación



“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL FEED-FORWARD DE TEMPERATURA PARA EL PROCESO DE ESTERILIZACIÓN DE PURÉ DE BANANO”

Examen Complexivo, Componente Práctico

Informe Profesional

Previa la obtención del título de:

MAGISTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

Autor: Ing. Daniel Moreano Ayala

GUAYAQUIL - ECUADOR

AÑO: 2015

## AGRADECIMIENTO

A mi padre y madre (†) quienes han dedicado toda una vida a formarme, a mi esposa y su familia, a mi hijo, a mis hermanas, quienes han creído en mí y apoyado en las buenas y malas circunstancias y a mis maestros a quienes les debo el profesionalismo con el cual he sido forjado.

## DEDICATORIA

A mi esposa, por ser el gran apoyo y complemento en mi vida y a mi hijo quien es la vida misma, para darle el ejemplo de perseverancia y que éste sea el punto de partida en su carrera profesional.

## TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



---

M.Sc. Sara Ríos  
Presidente



---

M.Sc. Dennys Cortez A.  
Vocal



---

Ph.D. Douglas Plaza G.  
Vocal

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Informe Profesional, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

Art. 12 del Reglamento de graduación



Ing. Daniel Moreano Ayala

## RESUMEN

La esterilización es un proceso utilizado para inactivar a las esporas bacterianas resistentes al calor, y que se hallan presentes en el alimento, como por ejemplo, en el puré de frutas que se utilizan como materia prima para la elaboración de otros productos como compotas, panes, jugos entre otros. Estos productos son calentados a temperaturas de 120 °C.

El proceso de esterilización se lo realiza mientras el puré de banano se encuentra en recirculación y manteniéndose a la temperatura de 120 °C y esta no debe bajar d 117 °C ya que esto significa que el puré no es seguro para su envase además de una contaminación del producto. La velocidad del flujo a la que se encuentra recirculando el producto depende de la disponibilidad de banano en procesos previos de pelado y de la demanda de envasado que eventualmente se tenga. La temperatura es regulada por medio de 4 válvulas de vapor que alimentan 4 sistemas de cuerpos de calentamiento llamados votator (intercambiador de calor) que es donde se eleva la temperatura del puré de banano de manera escalonada hasta que a la salida del cuarto cuerpo de calentamiento se tiene un sostén térmico el cual debe tener la temperatura de esterilización.

Al variar la velocidad del flujo y/o la demanda de flujo para producción el flujo se convierte en una perturbación muy grande haciendo decaer la temperatura por debajo de lo permitido y esto conlleva a un reinicio del proceso desde el lavado de toda la tubería. Este reinicio del proceso se traduce a tiempo improductivo, producto desperdiciado y energía inútil, es decir, dinero.

Para solucionar esta problemática se optó por cambiar la estrategia de control usando un “Control Feed-Forward” y ajustar correctamente los controladores. Donde el flujo del sistema en recirculación es la variable de perturbación anticipatoria o pre alimentado, no obstante, también se requirió un ajuste adecuado de los controladores.

El proceso, después de esta implementación mejoró notablemente. Las variaciones en el flujo de recirculación, así como la demanda de producción no causan pérdida de esterilidad ni puré de banano quemado en el caso de bajas velocidades del flujo porque esta variable ahora es parte integral del sistema de control.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
INTRODUCCION.....	xi
CAPITULO I	
1. SOLUCIÓN TECNOLÓGICA IMPLEMENTADA .....	18
1.1 Estrategia de Control.....	18
1.2 Instrumentación .....	19
1.2.1 El controlador.....	19
1.2.2 Válvula de Control.....	20
1.2.3 Sensor de Temperatura .....	22
1.2.4 Registrador de Papel .....	23



## CAPITULO II

2. RESULTADOS OBTENIDOS .....	24
2.1 Disminución de Eventos de Pérdida de Esterilidad .....	24
2.1.1 Respuesta al Cambio de Flujo de Recirculación.....	25
2.1.2 Respuesta la Demanda de Producción.....	26
2.2 Disminución de producto quemado .....	30
2.3 Disminución de tiempos improductivos.....	30
CONCLUSIONES .....	32
RECOMENDACIONES.....	34
BIBLIOGRAFIA.....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

a. Registro de Temperaturas.....	xiv
b. Registro de flujo del sistema.....	xv
c. Evento Pérdida de Esterilidad por Cambio de Flujo.....	xvi
d. Control Feed-Forward.....	xvii
1.1 Estrategia de Control Feed-Forward.....	19
1.2 Curva de Respuesta de Válvulas TRERICE.....	21
1.3 Válvula de Control Neumático.....	22
1.4 Sensor PT100.....	22
1.5 Registrador de Carta Circular.....	23
2.1 Diagrama del Nuevo Sistema de Control.....	25
2.2 Registro de Temperaturas.....	27
2.3 Registro de flujo del sistema.....	28
2.4 Evento Variación de Flujo sin Causar Pérdida de Esterilidad.....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

1.1 Comparación de Válvulas de Control.....	21
---	----

## INTRODUCCIÓN

La implementación del presente proyecto fue en la empresa BANALIGHT C.A. ubicada en el Km 4 ½ vía Durán – Tambo; el proyecto surge como necesidad de mejorar todo el proceso de producción y es una parte del todo.

El proyecto inicia desde la actividad de definir el problema conjuntamente con la experiencia de los operadores y el equipo de mantenimiento, seguidamente del estudio de la solución y requerimientos de equipos y logística acordada con los relacionados, la compra de los equipos y espera de la llegada de los mismos y por último su implementación y puesta en marcha donde se incluye el afinamiento y corrección de problemas que se presentaren en la implementación. Esto elaborándose en un lapso de aproximadamente 3 meses y una supervisión de la implementación de 3 meses más hasta llegar a los resultados definidos inicialmente.

En la empresa antes de la implementación del proyecto se tenía el problema de la **pérdida de esterilidad** y toda la producción posterior a esta falla, la cual altera la principal característica “puré de banano aséptico” del producto final.

Esta falla desencadenaba otros problemas los cuales representaban una pérdida económica significativa. Esta pérdida de esterilidad se relaciona con control clásico PID que no es suficiente para corregir esta caída de temperatura debido a una de sus desventajas que es la reacción únicamente sobre el error de la variable controlada y actuando sobre un elemento de control final solo cuando el error ya se ha presentado.

En vista de este control deficiente y basándose en los estudios gráficos de registros, observación en la operación del proceso y el intercambio de ideas con las personas relacionadas a este proceso se establece que el control debe responder también a las variaciones de flujo. En la figura (a) se pueden observar tres pérdidas de esterilidad, la línea roja y línea azul son las temperaturas de entrada y salida respectivamente del sostén térmico en °C, en la figura (b) la variación del flujo descrito por la línea roja en unidades  $\times 100$  l/h que causa esta anomalía y en la figura (c) el momento donde se presenta esta pérdida de esterilidad.

La disminución de las pérdidas de esterilidad representa tiempo aprovechado en la misma producción, ya que volver a empezar el proceso de arranque demanda aproximadamente 2 horas. Lo que incrementa significativamente la producción.

El control feed-forward (anticipativo) es un control que se adapta a la solución de este problema, en vista de que vincula una señal de perturbación que sea “claramente identificada”. En la figura (d) se muestra este control y la relación que existe entre la salida del controlador PID y la perturbación.

El planteamiento de este proyecto se realiza para generar y desarrollar una aplicación que permita a la empresa Banalight C.A., a fin de brindar la posibilidad de llevar una producción sin paradas, cumplir con los mantenimientos establecidos e incrementar su productividad, así como disminuir las incertidumbres y mejor entendimiento del proceso.

Tomando en cuenta que el problema está relacionado con el sistema de control, este proyecto va dirigido al departamento de mantenimiento eléctrico de la empresa Banalight C.A., ubicada en la ciudad de Durán de la provincia del Guayas. El desarrollo de este proyecto se divide en dos capítulos: el capítulo uno describe los equipos y estrategia utilizadas para la solución del problema de pérdida de esterilidad, y en el capítulo dos se describen los resultados obtenidos por haber corregido la pérdida de esterilidad.

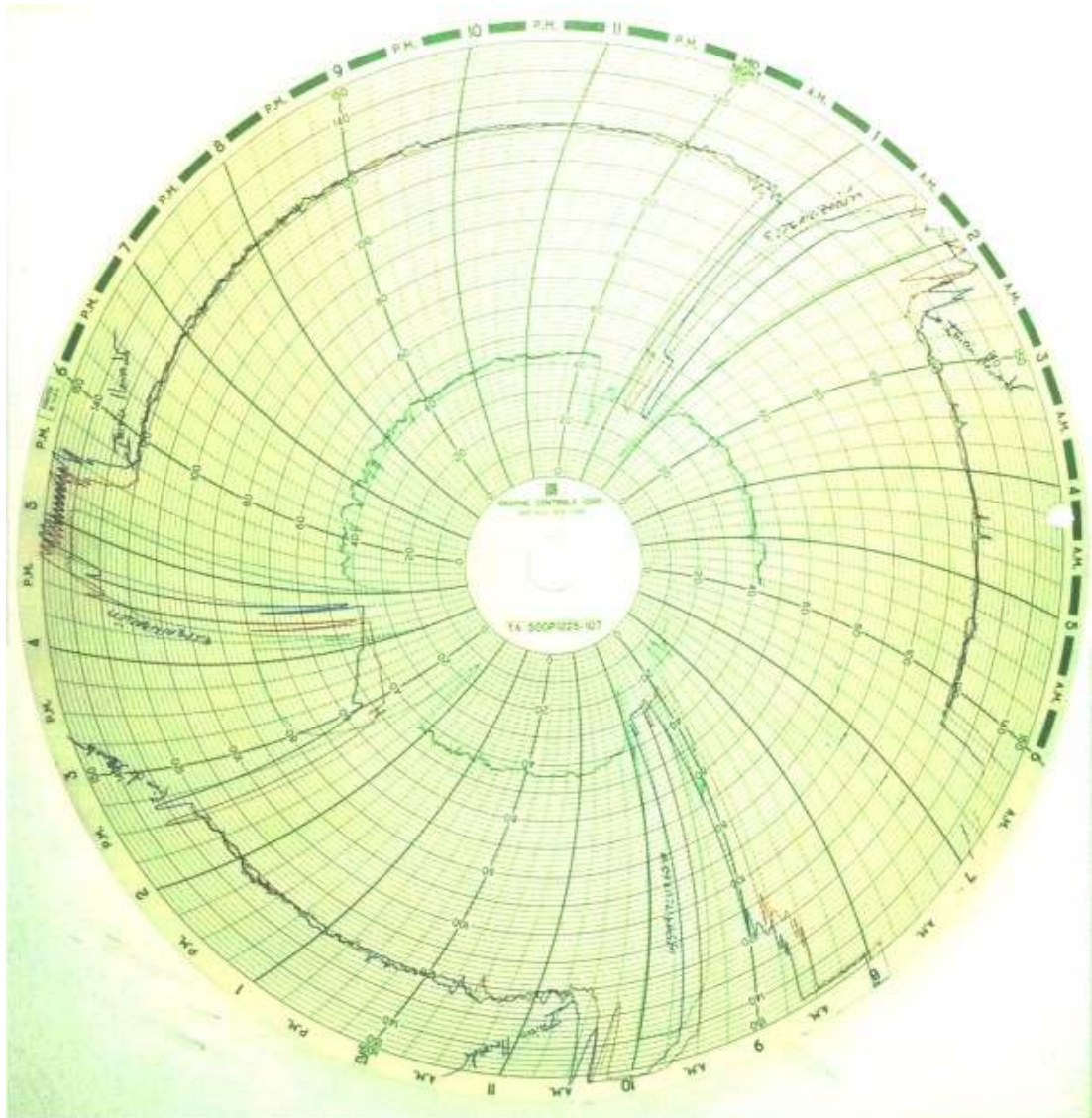


Figura (a). Registro de Temperaturas. Se puede observar la pérdida de esterilidad.

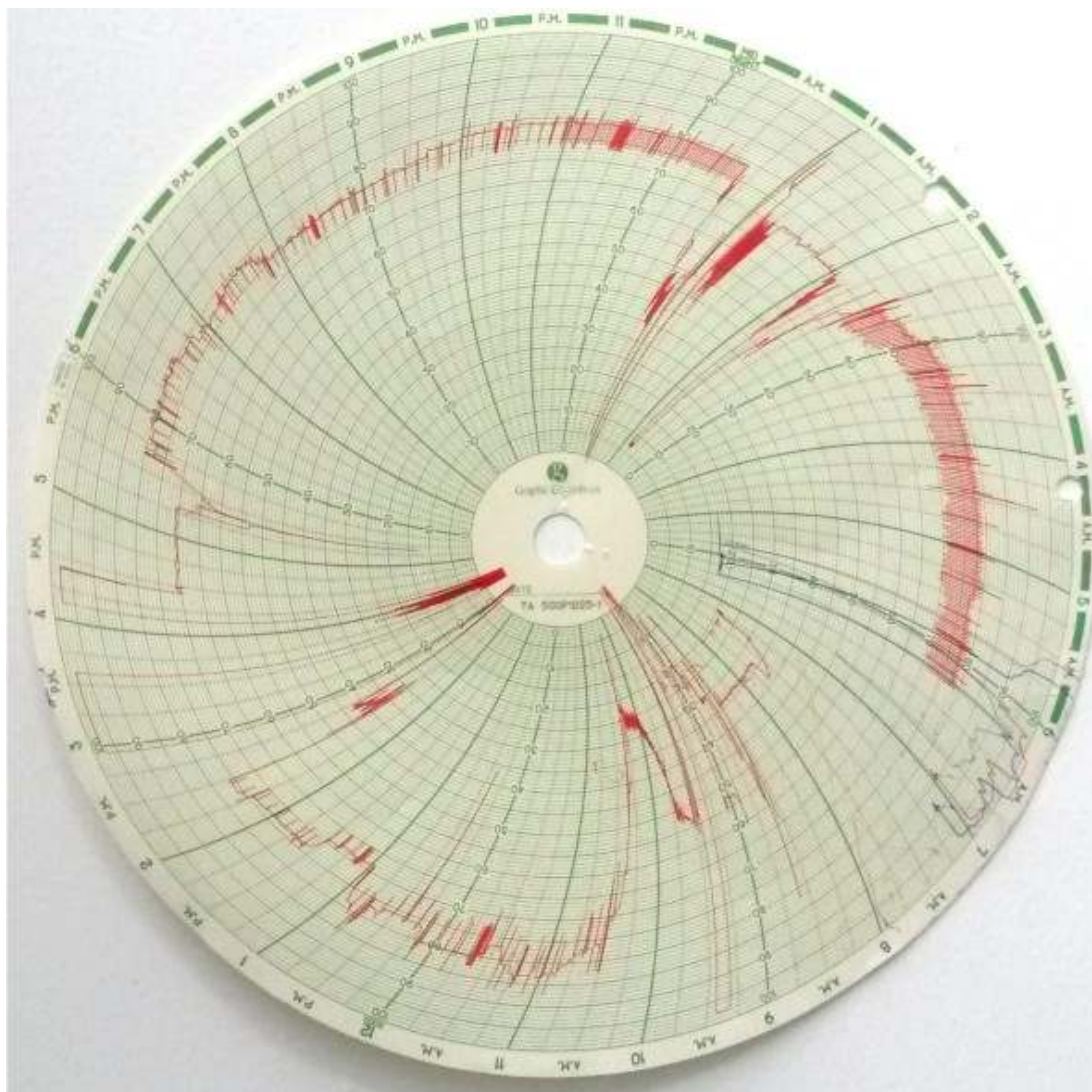


Figura (b). Registro de Flujo del Sistema. La variación del flujo depende de la demanda de producción y/o fruta existente en la entrada el proceso.



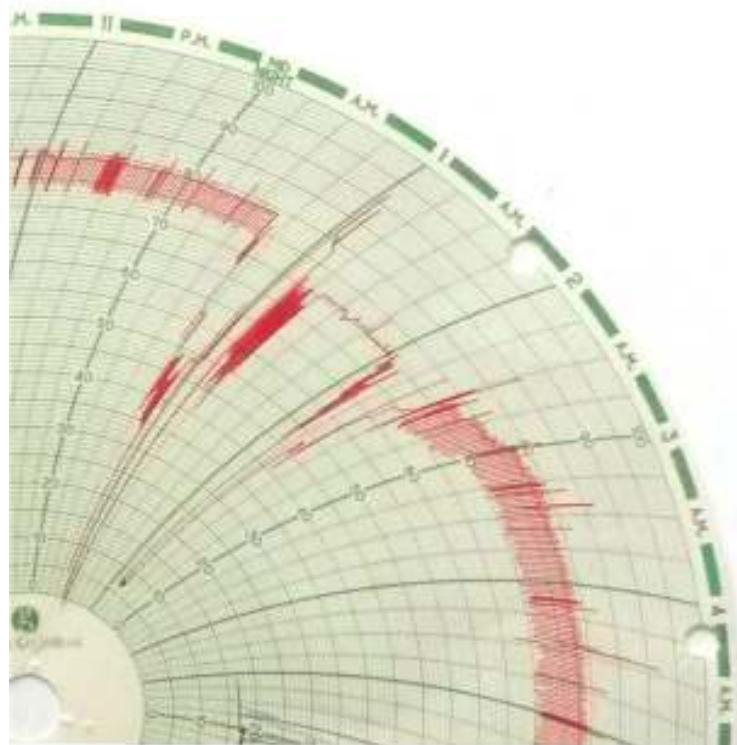
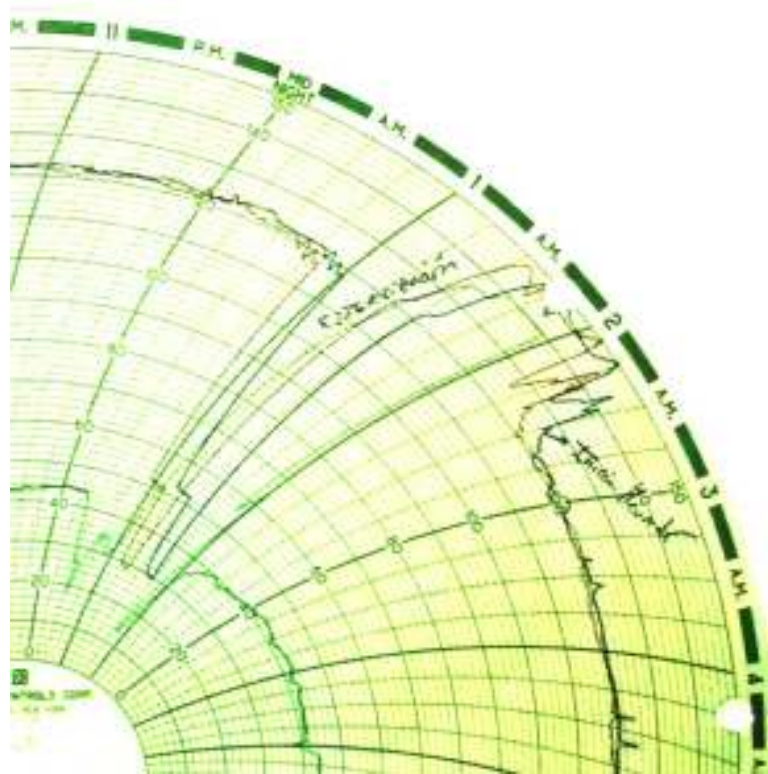


Figura (c) Evento Pérdida de Esterilidad por Cambio de Flujo.

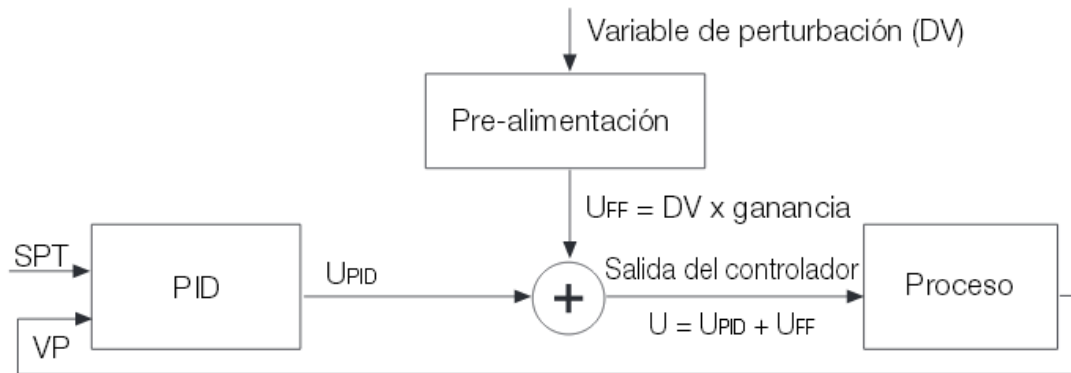


Figura (d) Control Feed-Forward

# **CAPÍTULO I**

## **1.SOLUCIÓN TECNOLÓGICA IMPLEMENTADA**

En este capítulo se describe el equipamiento utilizado para la solución del control de temperatura en el proceso de esterilización de puré de banano.

### **1.1 Estrategia de Control**

El establecer la estrategia de control del sistema es un aporte de la experiencia de los operadores del sistema, ya que se definió que las variaciones de flujo son las principales perturbaciones del sistema. El control consta de un algoritmo PID y además su salida también es función de la variable de perturbación seleccionada como se muestra en la figura 1.1.

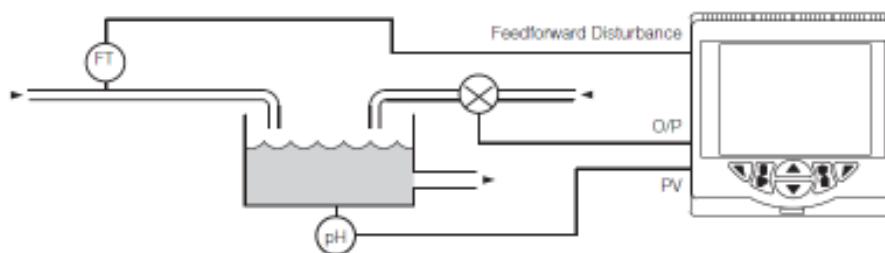


Figura 1.1 Estrategia de Control Feed-Forward

## 1.2 INSTRUMENTACIÓN

### 1.2.1 El controlador

El instrumento CM30 de la marca ABB (Asea Brown Boveri) es un controlador de altas prestaciones que contiene plantillas preestablecidas como por ejemplo:

#### Plantillas Básicas

- Lazo Simple con Punto de Consigna Local
- Lazo Simple con Punto de Consigna Remoto

#### Plantillas Extendidas

- Lazo Simple con Feed-Forward
- Lazo Simple con Feed-Forward y Punto de Consigna Remoto
- Cascada
- Cascada con Punto de Consigna Remoto

- Cascada con Feed-Forward
- Control de Relación con Factor Interno
- Control de Relación con Factor Externo

### **Lazo Simple con Feed-Forward**

Esta plantilla añade la función de anticiparse al lazo simple de control. El control anticipatorio permite al controlador CM30 responder a ocurrencias del proceso que no son detectadas por la señal de la variable del proceso. En la figura 1.1 se muestra un ejemplo de regulación de flujo de una bomba de dosificación usada para neutralizar el pH de agua residual. La velocidad de flujo de descarga del agua residual es monitoreada y anticipada por el controlador CM30, cuando el flujo se incrementa, la velocidad de la bomba dosificadora incrementa automáticamente para neutralizar el volumen extra de descarga residual.

### **1.2.2 Válvula de Control**

La válvula de control es una de las selecciones más importantes para un óptimo comportamiento del sistema, ya que, esta podría ser una perturbación si no es debidamente seleccionada. Las válvulas de control TRERICE proveen una gama de opciones que

se seleccionan de acuerdo al tipo de fluido que se controlará y su coeficiente. La válvula seleccionada es la 910EPC ya que su comportamiento permite una apertura de flujo de manera relativamente lineal y proporcional como se muestra en la figura 1.2, es de dos vías, se la encuentra disponible en tamaño de ½” a 2” y su precio es moderado.

Consideration	910	910T	910EP	940	940E
Actuation	Pneumatic	Pneumatic	Pneumatic	Pneumatic	Electric
Control Action	On/Off	Proportional	Proportional	Proportional	Proportional
Input Signal	15 psig	3-15 psig	3-15 psig	3-15 psig	4-20 mA / 0-10 VDC
Application	Standard Duty	Standard Duty	Standard Duty	Heavy Duty	Heavy Duty
Price	Economical	Moderate	Moderate	Premium	Premium
Response Time	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Average
Available with Positioner	No	No	No	Yes	Not Required
Shut-Off Pressure*	≤ 250 psig	≤ 250 psig	≤ 250 psig	≤ 720 psig	≤ 400 psig
Valve Sizes	½" thru 4"	½" thru 4"	½" thru 2"	½" thru 8"	½" thru 8"
Valve Styles	Single Seat Double Seat	Double Seat** 3-Way	Single Seat	Single Seat Double Seat 3-Way	Single Seat Double Seat 3-Way
Valve Materials	Bronze Cast-Iron Cast-Steel Stainless Steel	Bronze Cast-Iron Stainless Steel	Bronze	Bronze Cast-Iron Stainless Steel	Bronze Cast-Iron Stainless Steel
Trim Styles	Modified Linear	Modified Linear	Equal Percentage	Equal Percentage Modified Linear	Equal Percentage Modified Linear

Tabla 1.1 Comparación de Válvulas de Control

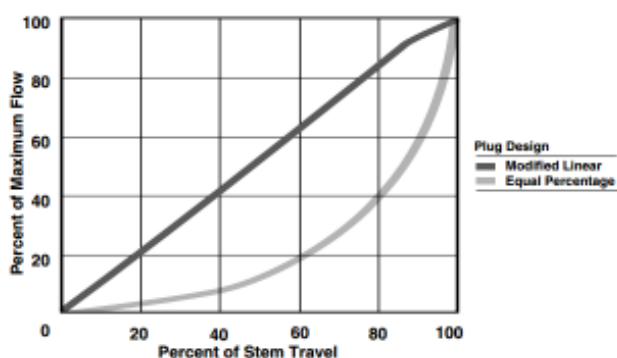


Figura 1.2 Curva de Respuesta de Válvulas TRERICE



Figura 1.3 Válvula de Control Neumático

### 1.2.3 Sensor de Temperatura

El sensor de temperatura exige una precisión moderada, por lo que se usa una resistencia de platino PRT PT100, la cual debe ser debidamente calibrada con el método Callendar Van Duessen para garantizar la medida real del sistema.



Figura 1.4 Sensor PT100

#### 1.2.4 Registrador de Papel

Como parte integral de un sistema de control se utiliza un medio de gráfica para las variables del proceso que se consideren relevantes para la interpretación de la eficiencia del mismo control. En este caso, el medio de registro de las variables debe ser de papel debido a requerimientos de venta. El instrumento Commander1900 es un graficador de carta circular que permite ser programado. Con una hasta tres plumas que dibujan las variables y hasta una cuarta pluma que puede graficar los eventos que a ella se la relacione como por ejemplo umbrales de alarmas, entradas digitales y resultados de funciones matemáticas.

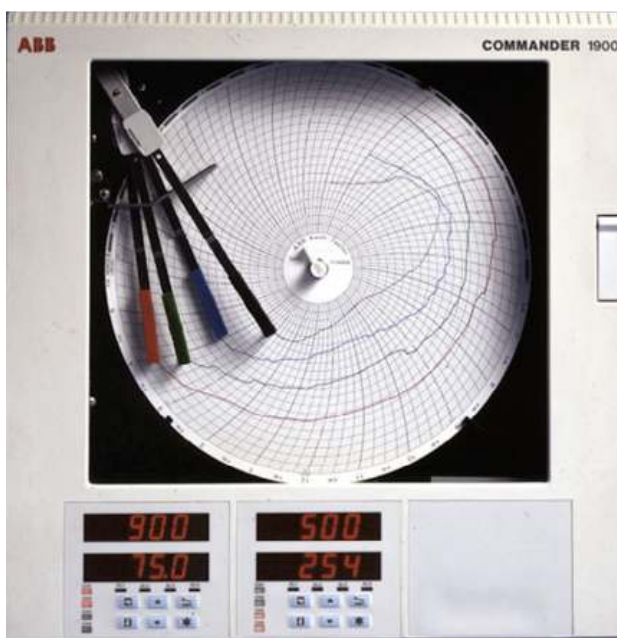


Figura 1.5 Registrador de Carta Circular



## **CAPÍTULO II**

### **2. RESULTADOS OBTENIDOS**

La nueva estrategia de control para la elaboración de puré de banano se muestra en la figura 2.1 y los resultados de este cambio de control se pueden expresar en términos mejor respuesta a las variaciones del flujo en demandas significativa

#### **2.1 Disminución de Eventos de Pérdida de Esterilidad**

La pérdida de esterilidad se presentapor la caída de temperatura del puré de banano por debajo de los 117 °C la línea principal después de un sostén térmico; La pérdida de esterilidad se presenta en dos formas, la primera es por el incremento de la velocidad del flujo en la línea principal del proceso de esterilización y la segunda por la demanda de producción en el llenado de tanques.

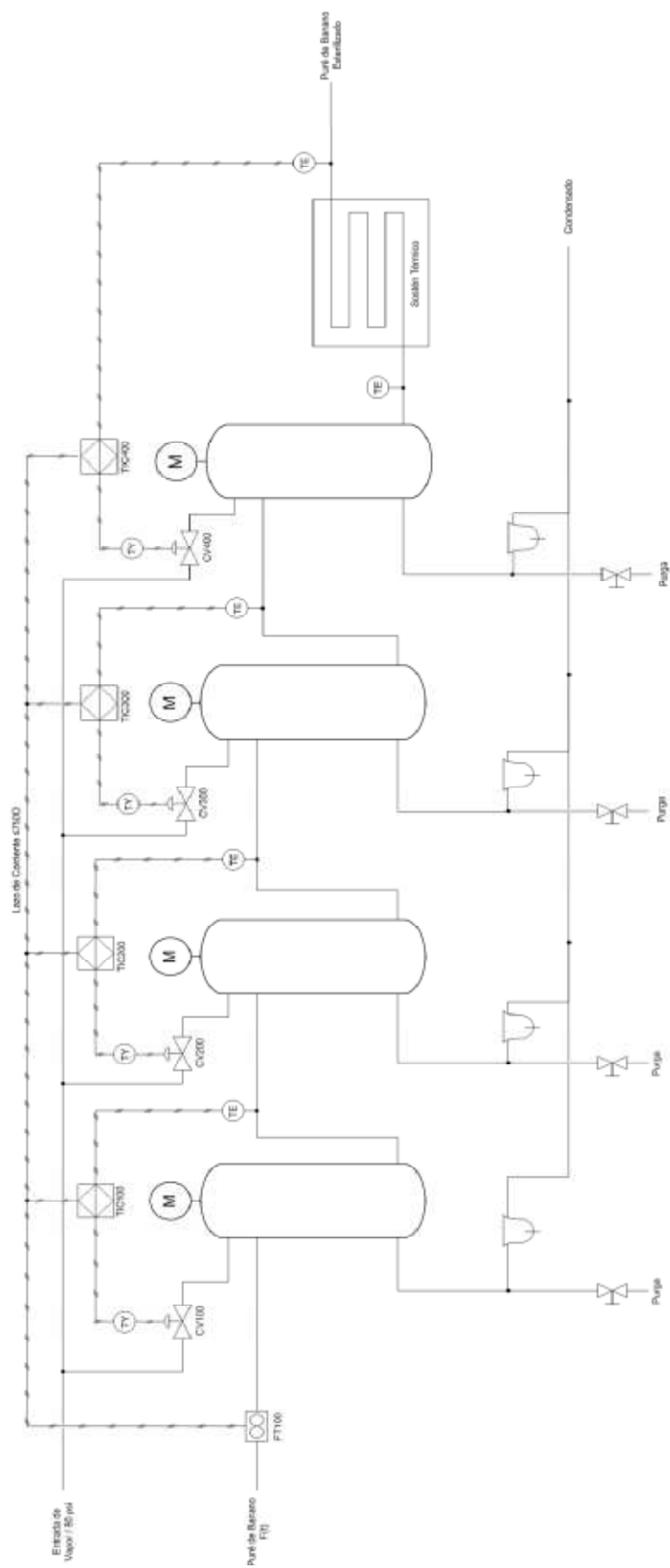


Figura 2.1 Diagrama del Nuevo Sistema de Control

### **2.1.1 Respuesta al Cambio de Flujo de Recirculación**

El sistema es capaz de responder a variaciones de flujo, antes correr a velocidades de 5000 litros/hora era un desafío. A partir de la implementación se corre a una velocidad de 8000 litros/hora. Lo cual significa un incremento del 60% en la velocidad de producción e incide también en la velocidad a la que se puede producir.

### **2.1.2 Respuesta la Demanda de Producción**

El proceso de llenado consta de una máquina aséptica que desvía el producto esterilizado y enfriado a los tanques que serán almacenados como producto final. Este proceso afectaba al flujo de recirculación de producto y por lo tanto a la temperatura de esterilización. El proceso estaba limitado a condiciones como flujo mínimo en el sistema, esto significa que la producción también estaba limitada a estas condiciones. En estas circunstancias se tenía una producción inferior a la actual ya que ahora el proceso de llenado es continuo, sin importar la velocidad del flujo.

El las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se muestra la producción de un día sin anomalías, por lo tanto una producción constante.

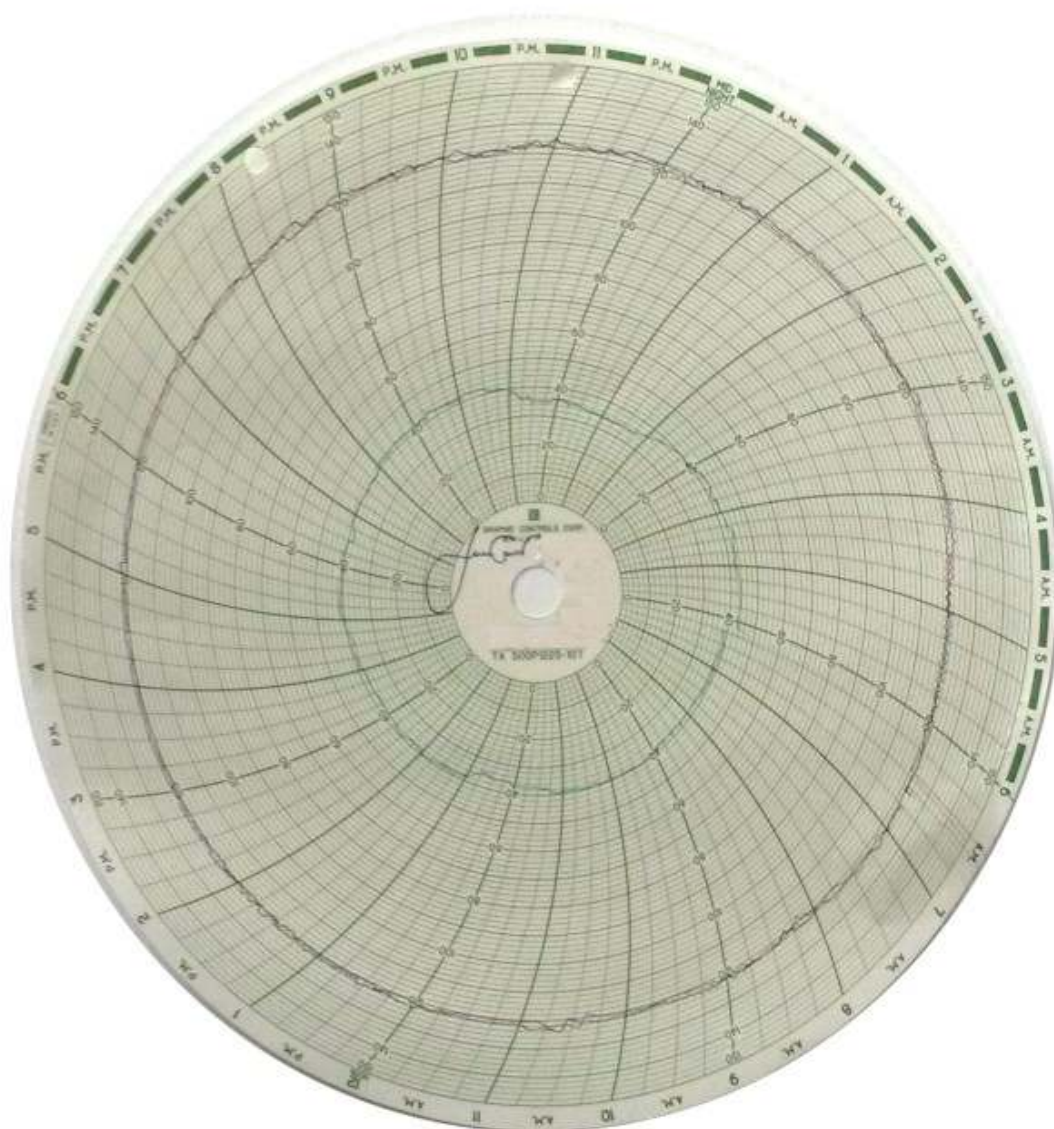


Figura 2.2 Registro de Temperaturas. No existe pérdida de esterilidad.

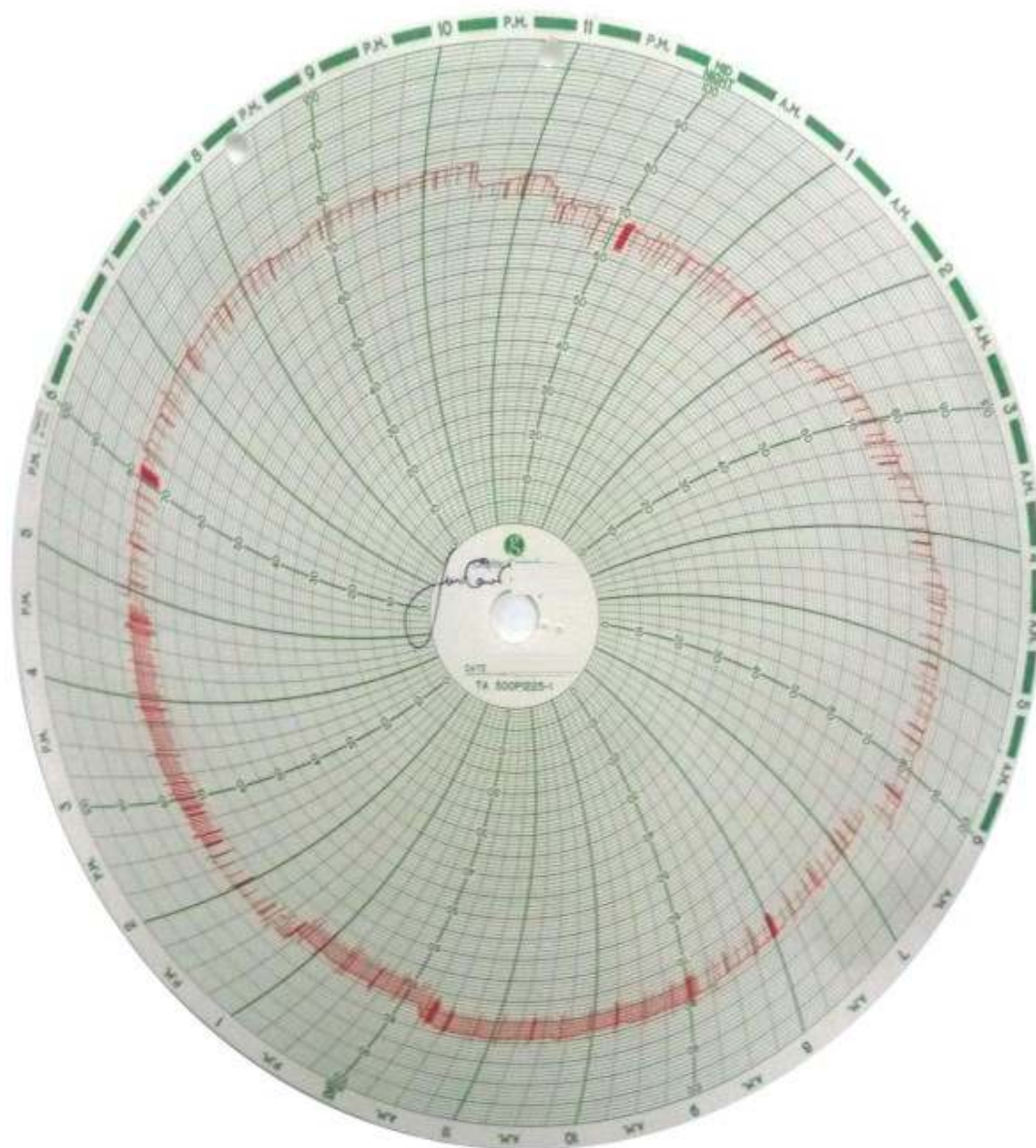


Figura 2.3 Registro de flujo del sistema. El flujo varía de acuerdo a los requerimientos.

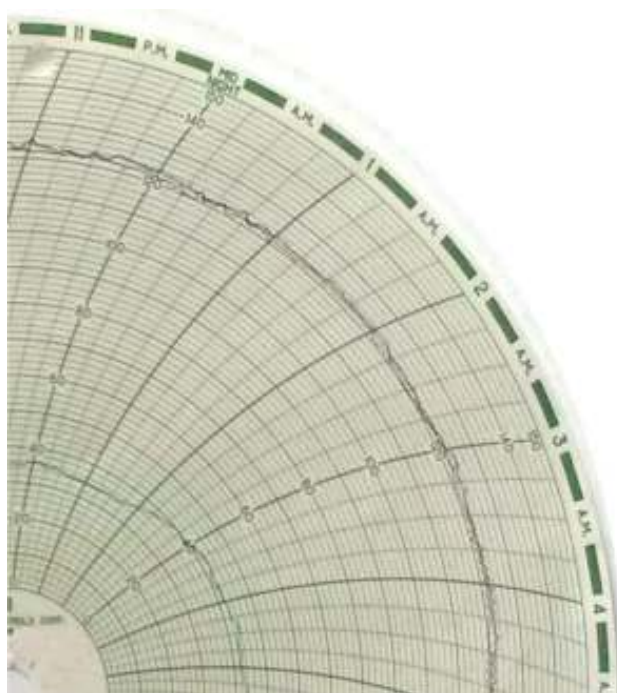
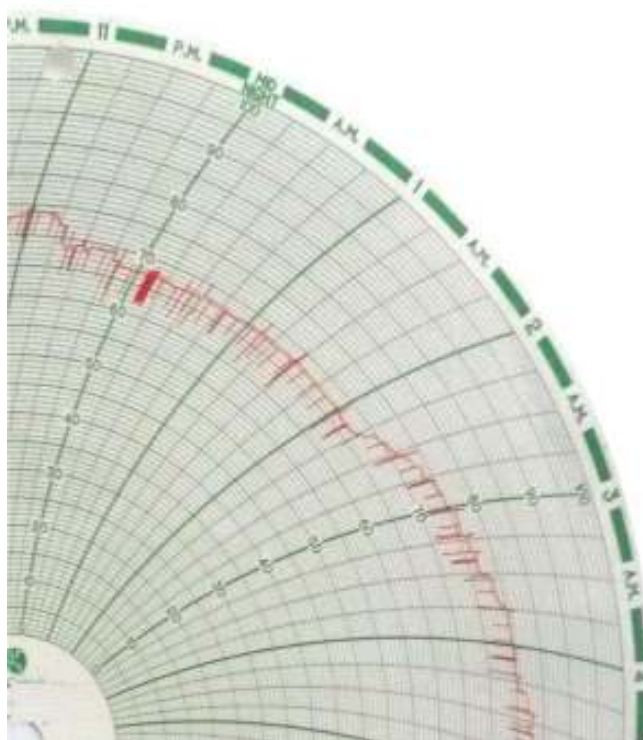


Figura 2.4 Evento Variación de Flujo sin Causar Pérdida de Esterilidad.

## **2.2 Disminución de producto quemado**

Cuando la temperatura del producto sube bruscamente debido a una gran perturbación por el cambio del flujo, se llegaba a elevar la temperatura por encima de los 122°C, lo cual ocasiona en ciertas condiciones de la fruta el quemado del puré de banano. Esto también fue resuelto, disminuyendo de manera considerable el producto quemado lo que conlleva al aprovechamiento de la materia prima y un ahorro considerable de los insumos por la eficiencia conseguida.

## **2.3 Disminución de tiempos improductivos**

Al perder la esterilidad se debe reiniciar todo el proceso desde el lavado CIP hasta conseguir nuevamente la esterilidad de la fruta. En la figura 2.5 se puede observar que el reiniciar el sistema toma alrededor de dos horas, y tener una o dos paradas por día resulta ser tiempo improductivo, ya que durante este periodo el proceso se detiene desde las peladoras hasta la producción.

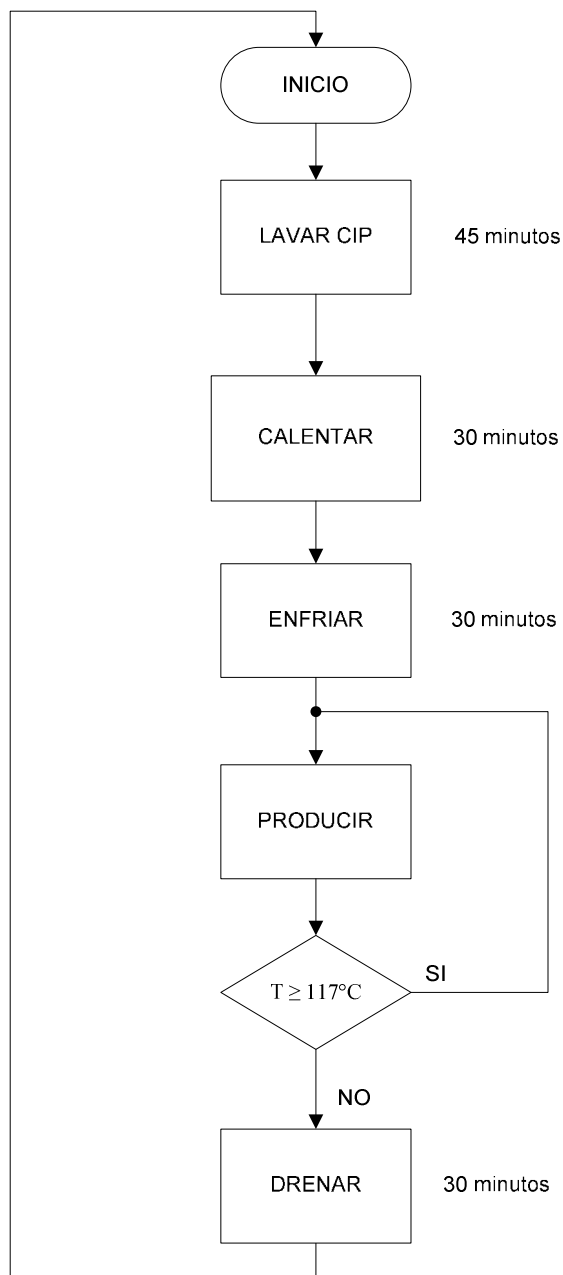


Figura 2.5 Flujo del Proceso de Arranque de la Planta



## CONCLUSIONES

1. El controlador clásico PID es un sistema que sencillamente funciona en la industria, sin embargo, su principio de funcionamiento de reaccionar sobre el error existente funciona siempre y cuando no existan señales que perturben este de manera que se vuelva incontrolable la variable de salida. Para esto se tienen varias soluciones como las estrategias de control como son el feed-forward, predictivo (compensación del tiempo muerto), adaptivo, cascada entre otros ó controles mucho más robustos que comprenden el control moderno como son el multivariable, lógica difusa, redes neuronales, entre otros que tienen un mejor rendimiento. Este incremento del rendimiento de los controladores es claramente debido a que en su control interviene una variable más que afecta la salida del controlador que mejora notablemente el mismo.
2. Al mejorar el rendimiento del controlador en términos de velocidad de respuesta y anticipación del error, se puede producir de manera confiable y segura eliminándose las limitantes de producción continua restringida por demanda excesiva del envasado y la restricción de producto entrante en el sistema.

3. En consecuencia, se redujeron las paradas no programadas de producción por motivos de pérdidas de esterilidad a cero frente a las tres, cuatro y hasta cinco paradas que regularmente se tenían. Es decir, se aumentaron aproximadamente diez horas de producción por semana. Además, la materia prima ya no es desperdiciada por motivos de evacuar el puré para iniciar el lavado nuevamente.

## RECOMENDACIONES

1. Para el ajuste de parámetros de control del equipo ABB CM30 es necesario conocer el funcionamiento a través del manual de usuario, con realce en la ganancia estática de la pre-alimentación, ya que de esta depende el funcionamiento del sistema.
2. Cuando se recogen ideas de las causas vinculadas al problema principal; mucha información es obsoleta y que pueden sonar mayormente a excusas y no aportar a la solución. Por eso, hay que ser muy cuidadoso al momento de orientar la respuesta al problema principal, ya que podría direccionarse involuntariamente a una falsa solución y más bien descartar una inquietud.
3. La calibración de equipos y sensores en este caso las PRT's son primordiales para un resultado óptimo en el control de procesos alimenticios. Por lo que, es necesario mantener periódicamente un registro de estas calibraciones.

## BIBLIOGRAFIA

[1]Food-Info.net, ¿Cuál es la diferencia entre pasteurización y esterilización?,  
<http://www.food-info.net/es/qa/qa-saf17.htm>, fecha de consulta agosto 2015.

[2]Asea Brown Boveri, ABB, Data sheet DS/CM30–EN Rev. L  
[https://library.e.abb.com/public/38fc981d184bf401c1257b52003f2ccb/DS\\_CM30-EN\\_L.pdf](https://library.e.abb.com/public/38fc981d184bf401c1257b52003f2ccb/DS_CM30-EN_L.pdf), fecha de consulta agosto 2015.

[3]TRERICE, ValveSelection,  
[http://www.cpinc.com/Trerice/Control/control\\_109\\_112.pdf](http://www.cpinc.com/Trerice/Control/control_109_112.pdf), fecha de consulta agosto 2015.

[4]Asea Brown Boveri, ABB, Registradores de Gráfica Circular,  
<http://www.instrumart.com/assets/registrador-grafico-circular-abb-C1900-guia-de-operacion-PDF-spanish.pdf>, fecha de consulta agosto 2015.