Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica

Automatización de dos lazos de control para el proceso evaporación de leche en una línea de producción de leche condensada

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Andrés Murillo Barrios

Cartago Diciembre, 2011

INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

Ing Juan Carlos Jiménez R

Profesor asesor

Ing Sergio Morales H

Profesor lector

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, Diciembre de 2011

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago Diciembre, 2011

Andrés MB.

Andrés Murillo Barrios

Cédula: 2 0587 0080

RESUMEN

La empresa SIQ Sistemas IQ surge en Octubre del año 2004, heredando la metodología, conocimiento y personal de la división de automatización de la empresa Elvatron S.A., entre sus tareas se encuentra la utilización de la ingeniería en la integración de sistemas para automatización y control en la industria tanto nacional como para Centroamérica y el Caribe.

La empresa contratante trabaja en la fabricación de productos lácteos, para ello cuenta con diversos equipos como lo son los evaporadores, en la industria de los lácteos este tipo de sistemas son utilizados en el proceso de deshidratación de la leche, para este caso se convierte la leche en un concentrado, y con ello obtener un producto como lo es la leche condensada. Con base en un contrato se le solicita a la empresa SIQ Sistemas IQ realizar la modernización de la etapa de control de un evaporador ya existente en dicha empresa, y con ello minimizar los costos de la compra de un nuevo equipo evaporador de leche, invirtiendo solo en la etapa de control.

En este documento se presenta una solución basada en el diseño del control de dos lazos en el evaporador, y con ello poder controlar la presión de vapor y el vacío dentro del evaporador.

Palabras clave: Evaporador, Modelado matemático, Controlador lógico programable, sensores, válvulas de control, controlador PID.

ABSTRACT

The company sistemas IQ was established on October 2004 inheriting the methodology, knowledge and automatization personnel division of Elvatron S.A. Among its tasks, it can be found the use of engineering in the integration of systems for automation and control. Its services are provided nationwide, as well as for Central America and the Caribbean.

The hiring company works in the manufacturing of dairy products; for that matter, it relies on various equipments such as evaporators. In the dairy industry, these kinds of systems are used in the dehydration process of milk. For this case, the milk is turned into a concentration and thus obtain a product as condensed milk. Based on an agreement, the company sistemas IQ is requested to perform the upgrade of the control phase of an existing evaporator in the company. Thereby, minimize the costs of purchasing a new milk evaporator. The purpose of this is to invest only in control phase.

This document presents a solution based on the control design of two loops in the evaporator, and thus control the vapor pressure and vacuum inside the evaporator.

Keywords: Evaporator, mathematical modeling, programmable logic controller, sensors, control valves, inverters, PDI controller.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi padre, madre, tíos y mi familia en general por darme la oportunidad y la ayuda para terminar mi carrera de ingeniería.

Agradecer al personal De sistemas IQ, quienes han compartido su experiencia y me brindaron la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación con ellos.

A mis profesores a lo largo de la carrera, quienes me han inculcado el valor del esfuerzo, y que siempre con ello se puede salir adelante.

ÍNDICE GENERAL

Capitulo 1. Introducción 14

1.1 Problema existente 15

1.2 Solución seleccionada 16

Capitulo 2. Meta y Objetivos 18

2.1 Meta 18

2.2 Objetivo general 18

2.3 Objetivos específicos 18

3 Capitulo 3. Marco teórico 20

3.1 Sistemas de evaporación. 20

3.1.1 Evaporador de película descendente básico 20

3.1.2 Evaporador de película descendente con recirculación forzada ... 25

3.1.3 Requerimientos de la empresa contratante para la implementación de los lazos de control. 26

3.2. Descripción del Hardware a utilizar 29

3.2.1 Controladores programables PAC y PLC 29

3.2.2 Sensores y transmisores de señal 30

3.2.3 Válvulas de control 31

3.2.3.1 Respuesta dinámica de la válvula 31

3.3. Descripción del Software a utilizar 33

3.3.1 Software de desarrollo RSlogix 5000 33

3.4. Control automático 33

3.4.1 Control en lazo cerrado y función de transferencia 34

3.4.2 Método de curva de de reacción de Ziegler-Nichols..... 35

3.4.3 Controlador de atraso o PI 37

4 Capítulo 4. Procedimiento Metodológico 38

4.1 Reconocimiento y definición del problema 38

4.2 Obtención y análisis de información 38

4.3 Implementación de la solución 39

5 Capítulo 5. Descripción detallada de la solución 41

5.1 Análisis de las características principales de la solución..... 41

5.2 Descripción del hardware utilizado para el sistema de control 41

5.2.1 Acondicionamiento de la señal del sensor de temperatura. 43

5.2.2 Válvulas proporcionales para el control de flujo de vapor y caudal de agua de enfriamiento. 46

5.3 Implementación de los lazos de control..... 47

5.3.1 Lazo de control de temperatura en el efecto II. 49

5.3.1.1 Función de transferencia de la válvula de flujo de vapor. 50

5.3.1.2 Función de transferencia del sensor de de temperatura. 54

5.3.1.3 Función de transferencia de calor del vapor al líquido en la calandria. 56

5.3.1.4 Diseño de la etapa de controlador del lazo de vapor. 65

5.3.2 Lazo de control de flujo de agua de enfriamiento. 68

5.3.2.1 Modelado del sensor de flujo. 70

5.3.2.2 Válvula de control de flujo de agua de enfriamiento. 72

5.3.2.3 Diseño de la etapa de control. 72

5.4 Diseño de los bloques de programación 75

5.4.1 Rutina PRINCIPAL. 77

5.4.2 Rutina CNTR_EFECTO2 y CNTR_VACIO. 78

5.4.3 Rutina escalamientos. 81

Capítulo 6: Análisis de Resultados 83

6.1 Resultados 83

6.1.1 Lazo de control de temperatura 83

6.1.2 Lazo de control de vacío por agua de enfriamiento 87

6.1.3 Pantalla para el ajuste del setpoint o valor deseado 89

6.1.4 Oferta del proyecto versus compra de un equipo de evaporación nuevo. 91

6.2 Análisis 92

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones 96

7.1 Conclusiones 96

7.2 Recomendaciones 97

Bibliografía 98

Apéndices 100

A.1 Abreviaturas 100

A.2 Programa implementado en el PLC para el control de los lazos.....100

A.3 Información sobre la empresa/institución [11].....103

Visión.....103

Misión.....103

Valores.....103

Información General.....103

Anexos.....105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evaporador de una etapa de película descendente sin recirculación..20

Figura 2. Control de vacío regulando la cantidad de agua de enfriamiento. 21

Figura 3. Sistema de sangrado, condensador de mezcla. 22

Figura 4. Evaporador de película descendente de dos efectos. 23

Figura 5. Detalle de la calandria en un evaporador. [1] 24

Figura 6. Detalle de un tubo dentro de la calandria. [1] 24

Figura 7. Detalle de un evaporador con recirculación. [1].....25

Figura 8. Detalle del lazo de vapor tomado del plano del evaporador proporcionado por la empresa contratante. 27

Figura 9. Detalle las regiones de operación de una válvula de control, característica de caudal. 32

Figura 10. Diagrama de bloques del control a lazo cerrado.....34

Figura 11. Gráfico en el que muestra como encontrar las constantes T y L. 36

Figura 12. Tabla con los rangos de temperatura para diferentes RTD Rosemount. 44

Figura 13. Diagrama del convertidor PT100/RTD Weidmueller y aspecto físico del mismo. 45

Figura 14. Configuración del convertidor PT100/RTD Weidmueller por medio de los Dip-Switch que posee. 45

Figura 15. Detalle del Rack principal de control, y los módulos utilizados. 46

Figura 16. Diagrama de conexión según el plano de SIQ. 47

Figura 17. Diagrama del evaporador scheffer y vista de los lazos de control de vapor y agua de enfriamiento. 48

Figura 18. Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura en la calandria. 49

Figura 19. Diagrama de bloques del modelo de la válvula. 50

Figura 20. Relación entre el desplazamiento y el caudal de la válvula. 51

Figura 21. Esquema para el balance de energía en la calandria. 57

Figura 22. Diagrama de bloques del evaporador. 61

Figura 23. Respuesta del evaporador y la válvula en lazo abierto. 65

Figura 24. Método de la curva de reacción de ziegler nichols aplicado al sistema. 66

Figura 25. Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura con el compensador. 68

Figura 26.Evaporador de película descendente de doble efecto. 69

Figura 27. Tabla con los datos para escalamientos del sensor según el diámetro de tubería 70

Figura 28. Protocolo HART, tiempos de respuesta del transmisor. 71

Figura 29. Lugar de las raíces para la función de transferencia de la válvula. ...73

Figura 30. Diagrama de bloques del lazo de agua de enfriamiento. 75

Figura 31. Definición de las rutinas de control de programa. 77

Figura 32. Llamado de las rutinas en el programa principal. 77

Figura 33. Rutina de CNTR_EFECTO2. 78

Figura 34. Configuración de las constantes de la función PID. 79

Figura 35. Configuración de las constantes de la función PID. 80

Figura 36. Detalle de la función PID para el efecto 2 y el control de vacío. 81

Figura 37. Escalamientos para los SETPOINT de cada uno de los lazos. 82

Figura 38. Respuesta para el lazo de temperatura para un escalón de 58°C. 83

Figura 39. Respuesta para el lazo de temperatura para un escalón de 58°C para un flujo de leche de 1.25 kg/s. 84

Figura 40. Respuesta para el lazo de temperatura para un escalón de 58°C para un flujo de leche de 3 kg / s. 85

Figura 41. Respuesta para el lazo de temperatura para un escalón de 65°C. 86

Figura 42. Gráfico donde se muestra la respuesta del lazo de control de temperatura. 87

Figura 43. Respuesta de lazo de agua de enfriamiento ante un escalón de 3l/s. 88

Figura 44. Diagrama de bloques para el sistema en realimentado si el controlador. 88

Figura 45. Respuesta del lazo de agua de enfriamiento sin compensador. 89

Figura 47. Ajuste de los valores deseados para el lazo de temperatura y vacío.90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos correspondientes al vacío requerido para una determinada temperatura de ebullición. [1].....28

Tabla 2. Cálculos para determinar constantes en controladores P, PI y PID.....37

Tabla 3. Características del controlador lógico programable a utilizar.....42

Tabla 4. Tabla con los datos de Cv para la válvula 24000C. 52

Tabla 5. Tabla con tiempos de retardo para diferentes tipos de transmisores. [10].....53

Tabla 6. Tabla con tiempos de retardo para diferentes tipos de transmisores..55

Tabla 7. Resumen con lo valores calculados de las constantes del modelo del evaporador.....64

Tabla 8. Resumen con lo valores para la válvula de agua de enfriamiento. 72

Tabla 9. Señales involucradas en el control. 76

Tabla 10. Costo del proyecto en porcentaje. 91

Tabla 11. Valores de sobreimpulso y tiempo de estabilización para diferentes flujos de entrada. 93

Capitulo 1. Introducción

La empresa SIQ Sistemas IQ surge en Octubre del año 2004, heredando la metodología, conocimiento y personal de la división de automatización de la empresa Elvatron S.A., entre sus tareas se encuentra la utilización de la ingeniería en la integración de sistemas para automatización y control en la industria tanto nacional como para Centroamérica y el Caribe.

La empresa contratante trabaja en la fabricación de productos lácteos en Panamá, para ello cuenta con diversos equipos como lo son los evaporadores, en la industria de los lácteos este tipo de sistemas son utilizados en el proceso de deshidratación de la leche, para este caso se convierte la leche en un concentrado, y con ello obtener un producto como lo es la leche condensada. Con base en un contrato se le solicita a la empresa SIQ Sistemas IQ realizar la modernización de la etapa de control de un evaporador ya existente en dicha empresa, y con ello minimizar los costos de la compra de un nuevo equipo evaporador de leche, cabe destacar que se trabajara solo con la etapa de evaporación, automatizando los lazos principales de control, ya que luego del evaporador pueden existir otras etapas dependiendo del producto que se quiera obtener.

Como parte de la modernización del sistema de control, sé requiere obtener un modelo matemático del comportamiento los elementos del evaporador, en la parte de presión de vapor, así como encontrar la relación entre el vacío y la temperatura de ebullición, para poder relacionar estos y obtener una solución de diseño del control adecuada que cumpla con el requerimiento de los lazos.

1.1 Problema existente

En las empresas es de suma importancia que sus equipos tengan soporte técnico, esto es muy difícil cuando la mayoría del stock de repuestos se encuentra desactualizado o es obsoleto, y este último empieza a presentar fallas con más frecuencia, es por ello que muchas empresas requieren migraciones de sus equipos de automatización.

En el caso de la empresa contratante, cuenta con un equipo de evaporación de leche, el cual requiere una modernización en el sistema de control, para ello se contrata a la empresa SIQ S.A (sistemas IQ) para que se haga cargo de las labores de automatización de este sistema de evaporación, y con ello minimizar costos, al invertir solo en la etapa de control, y no en un nuevo equipo de evaporación, además con ello contar con un amplio soporte tanto en repuestos como en software.

1.2 Solución seleccionada

Es necesario controlar los lazos de presión de vapor y el de vacío en la etapa de salida del evaporador, para llevar cabo dicho control se requieren obtener modelos matemáticos o empíricos de los lazos, por lo que en primera instancia se debe obtener dichos modelos, esto como punto de partida para empezar el diseño del controlador.

Como ayuda en el desarrollo de la solución a llevar a cabo se cuenta con el hardware y software de Rockwell, estos PLC cuentan con la facilidad de implementar controles PID los cuales se puede ajustar de diversas formas, y así gracias a la utilización de algún método de diseño de control, se pueden encontrar los valores convenientes a utilizar para la parte derivativa, la parte integral del controlador y con ello cumplir con los diversos requerimientos en la respuesta del sistema en cuanto a sobreimpulso y error en estado estacionario. También en el evaporador se necesita controlar las bombas y las válvulas, por lo que es necesario centralizar el control y que el hardware del PLC sea capaz de tener acceso y poder escalar las señales de los sensores que se requieren para el control de cada lazo.

Como parte del equipo de control contemplado en el diseño del sistema esta:

- CPU Allen Bradley CompactLogix 1769-L32E, en la que se carga el programa.
- Módulo de entrada analógica Allen Bradley 1769-IF8.
- Módulo de salidas analógicas Allen Bradley 1769-OF8C.
- Módulos de entrada digital 1769-IA16.
- Módulos de salida de rele 1769-OW16.

También se utilizara el software Scilab para la simulación de los modelos matemáticos del sistema en conjunto con el controlador diseñado, esta es una herramienta de uso libre o free software, muy similar a matlab.

Capitulo 2. Meta y Objetivos

2.1 Meta

Proporcionar a la empresa contratante un sistema de control automático capaz de regular el funcionamiento de un sistema de evaporación, para reducir costos de inversión en un nuevo evaporador.

2.2 Objetivo general

Desarrollar un sistema de control automático para un sistema de evaporación de leche, capaz de regular el funcionamiento del lazo de presión de vapor y el de vacío en la etapa de salida, según los requerimientos de temperatura de ebullición, y cantidad de agua evaporada.

Indicador: evaluación por parte del ingeniero encargado del proyecto en cuanto a cumplimiento de requerimientos en el control de los lazos de control del evaporador.

2.3 Objetivos específicos

1. Analizar el funcionamiento basado en la descripción operativa con el fin de determinar las características de los dispositivos a utilizar en el control de ambos lazos.

Indicador: Tener una lista del equipo necesario para llevar a cabo el proyecto, que cumpla con los requerimientos de control.

2. Realizar el modelado matemático de los lazos involucrados en el control, con base en la información proporcionada, características, funcionamiento y comportamiento de los sistemas de evaporación.

Indicador: Expresiones matemáticas de los dos lazos de control que en los que se trabajara en sistema de evaporación.

3. Diseñar los compensadores de los dos lazos de control con base en métodos teóricos, según los requerimientos de temperatura de ebullición y el vacío en el evaporador.

Indicador: Expresiones matemáticas de los compensadores, y utilizar un software de simulación como matlab o scilab para verificar el comportamiento de los lazos.

Capitulo 3. Marco teórico

3.1 Sistemas de evaporación.

3.1.1 Evaporador de película descendente básico

Un evaporador es un sistema que tiene la capacidad de extraer agua y convertir, en este caso, la leche en un concentrado, físicamente el aspecto es un tubo vertical de 1 metro de diámetro aproximadamente y de altura de entre 3 y 10 metros según se requiera en el proceso, en la Figura 1 se muestra el diagrama de un evaporador de película descendente básico de una etapa sin reconversión de vapor. Entre sus partes principales esta la calandria, la cual consta de una serie de tuberías individuales dentro del tubo principal, entre estas circula el vapor, en el interior de dichas tuberías se desliza la leche en forma de una película uniforme, con ello se reduce el grosor de la superficie a evaporar.

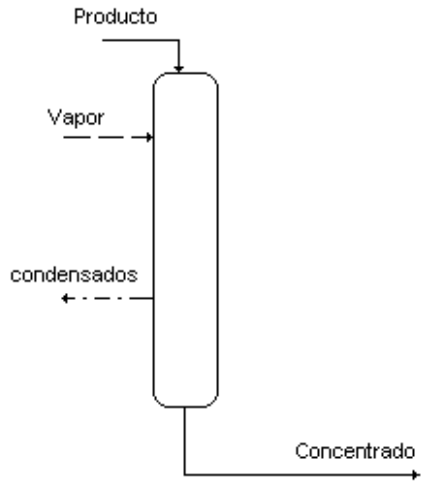

Figura 1. Evaporador de una etapa de película descendente sin recirculación

El caudal de alimentación de leche se mantiene constante, por lo que no es necesario realizar control de esta etapa, no es así para el caso del manejo de la presión de vapor, la cual a su vez controla la temperatura de pasteurización, la reconversión térmica de vapores RTV. El control de vacío en la etapa de salida

es otra variable que hay que controlar, esta es regulada por la cantidad de agua de enfriamiento, en la etapa de salida, según la información de GEA Evaporation Technologies [1], se explica dos formas de controlar el vacío, el primero como se observa en al Figura 2.

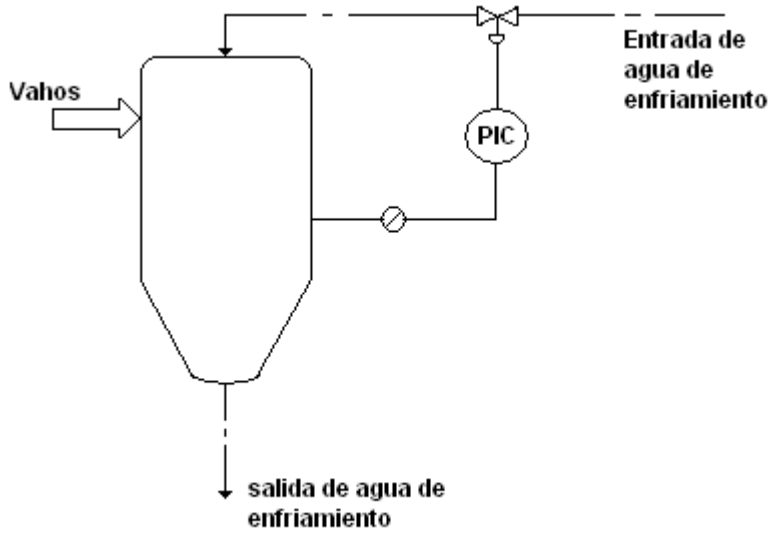

Figura 2. Control de vacío regulando la cantidad de agua de enfriamiento.

Por otro lado tenemos los sistemas de sangrado o condensador de mezcla en la que se usa aire para condensar la mezcla y variar los niveles de presión, con estos se logra controlar el vacío en la etapa final del evaporador cuando este es de múltiples efectos.

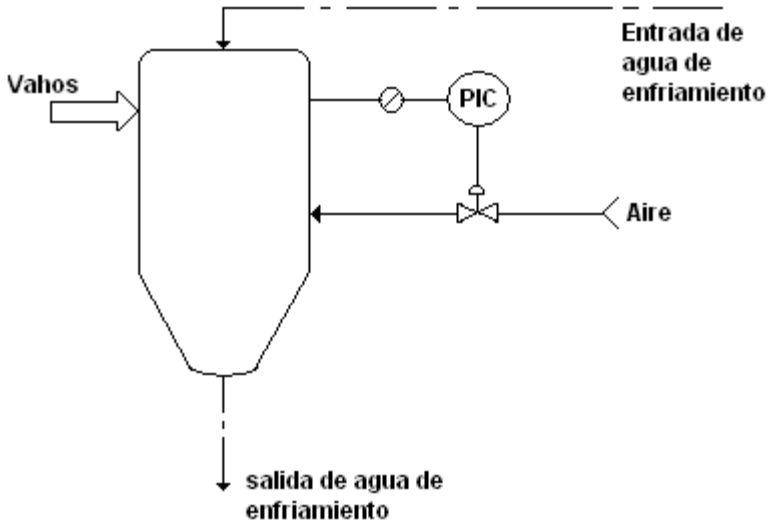

Figura 3. Sistema de sangrado, condensador de mezcla.

Por medio de este sistema se puede controlar el vacío a la salida del evaporador, cuando este es de un solo efecto.

En un sistema de evaporación de dos efectos el vacío en la primera etapa es controlado por medio de la evaporación en el segundo efecto, es decir el ritmo en el que se logra evaporar el líquido en la segunda etapa crea el vacío en la primera, un sistema de evaporación de dos efectos es necesario entonces controlar el flujo de vapor hacia la calandria del segundo efecto para así poder crear el vacío en la primera etapa.

En la Figura 4 se observa un evaporador de película descendente de doble efecto, este consta de un sistema de alimentación con el líquido a ser evaporado, después de esta etapa se pasa por un sistema de precalentamiento en el cual se eleva la temperatura hasta los 72 grados, con el vacío creado por la evaporación en la segunda etapa, el agua presente en el liquido se evapora, debido a esto a la salida del primer efecto se obtendrá un líquido con una concentración mas alta, el liquido concentrado proveniente de la primera etapa se inyecta en la calandria del segundo efecto, debido a la energía suministrada

en el primer efecto, en este caso en forma de calor, en la segunda etapa el agua presente en el liquido concentrado se va a evaporar a una temperatura menor, en este caso es de 58 grados para un evaporador sheffer, sin embargo la temperatura en cada uno de los efectos depende de el vacío dentro de la calandria.

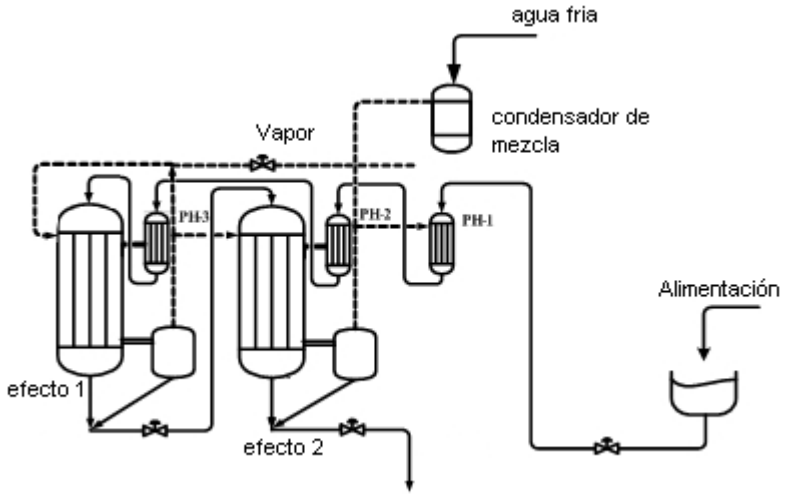

Figura 4. Evaporador de película descendente de dos efectos.

En la Figura 5 se observa en detalle como esta construida la calandria en su interior. El liquido a ser evaporado se inyecta por la parte superior y luego se desliza en el interior de cada uno de los tubos de los que esta constituido gracias a la fuerza de gravedad, y en cada uno de ellos se forma una película delgada, en la cual el vapor que circula dentro de la calandria puede evaporar mas fácilmente el agua presente en el liquido, al actuar de manera mas uniforme sobre la superficie, a su vez, los vahos (agua evaporado de liquido) gracias al vacío provocado, salen por la parte inferior de la calandria en donde un primer condensador separador lo recolecto, en algunos casos se utiliza este vapor o vahos para mezclarlos con el sistema de inyección de vapor, para reciclar la energía en forma de calor proveniente del primer efecto e inyectarlo en el segundo efecto.

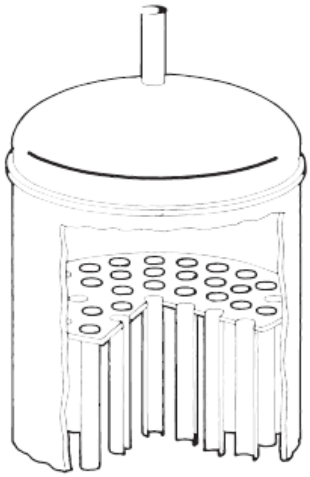

Figura 5. Detalle de la calandria en un evaporador. [1]

En la Figura 6 se observa el detalle de un tubo de los que forma parte de la calandria, por acción de la gravedad el liquido, en este caso la leche, forma una película delgada uniforme a lo largo de el tubo, el final de el mismo se obtendrá un concentrado de leche.

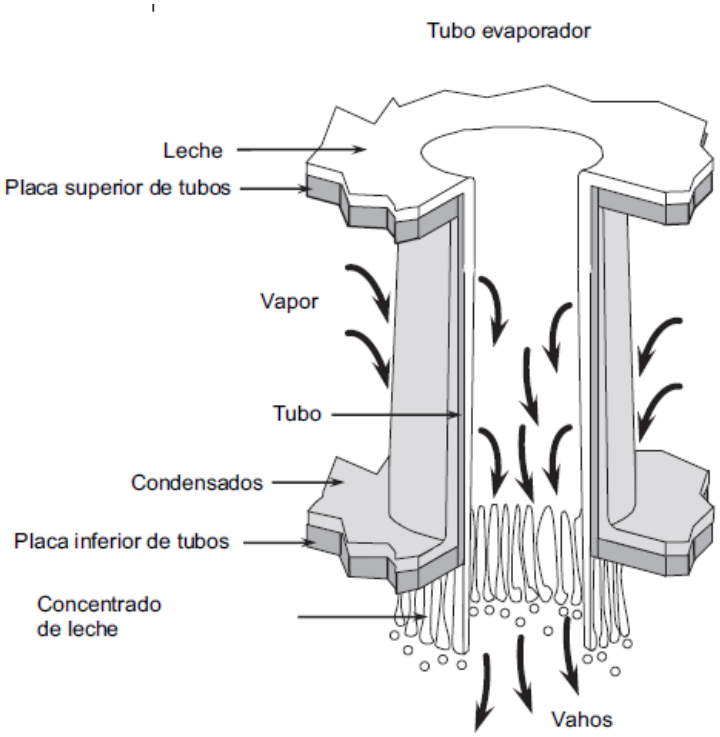

Figura 6. Detalle de un tubo dentro de la calandria. [1]

3.1.2 Evaporador de película descendente con recirculación forzada

Existe una variante del evaporador de película descendente, en la que se hace recircular el líquido a través de la calandria hasta obtener la concentración adecuada, gracias a la recirculación se pueden hacer evaporadores mas cortos, además se resuelve el problema de recubrimiento en los tubos lo cual afecta la evaporación, ya que hay un mayor contenido de sólidos en la mezcla, en la Figura 7 se muestra como esta constituido un evaporador de recirculación de película descendente.

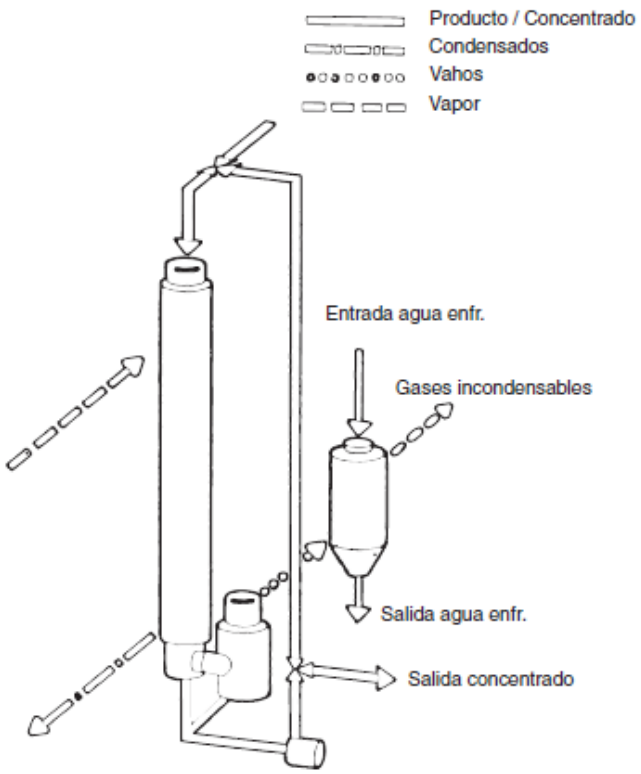

Figura 7. Detalle de un evaporador con recirculación. [1]

Parte del líquido se mantiene recirculando a través de la calandria el cual es mezclado de nuevo con el producto que alimenta el evaporador, esto se observa en la Figura 7.

3.1.3 Requerimientos de la empresa contratante para la implementación de los lazos de control.

Como se ha mencionado anteriormente, se requiere controlar los lazos principales de un evaporador, con el objetivo de que se pueda producir leche condensada, existe un lazo principal de control, el de vapor que controla la temperatura de evaporación en las calandrias. La empresa contratante suministro un plano con los detalles de construcción del evaporador scheffers, a este tipo de planos se les conoce como P&ID, y en ellos se muestra el detalles de tuberías y controladores por medio de una simbología. En la Figura 8 se observa una parte del diagrama de disposición del evaporador el cual ha sido facilitado por parte de la empresa contratante, en el mismo se puede observar que existe un tubería roja la cual alimenta con vapor a cada uno de los efectos del evaporador.

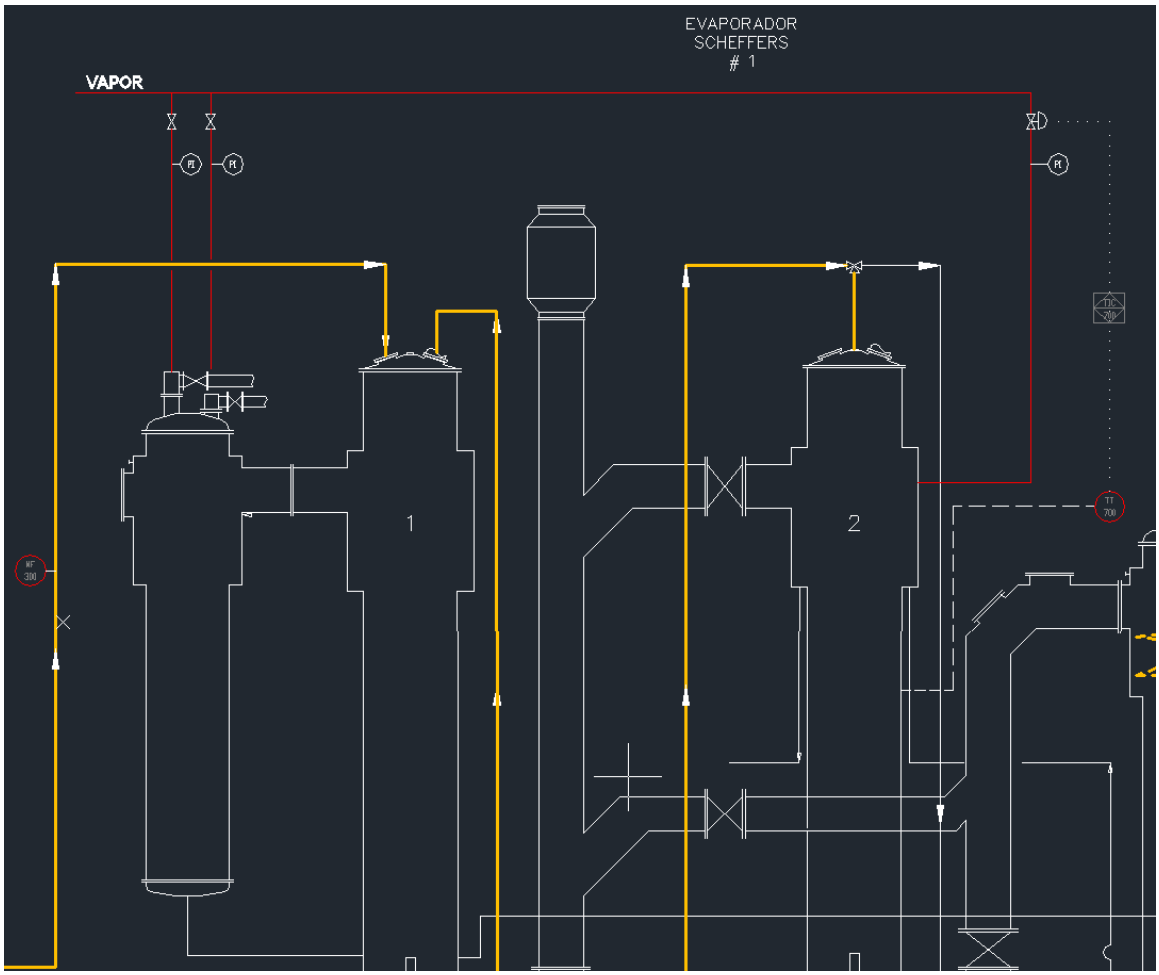

Figura 8. Detalle del lazo de vapor tomado del plano del evaporador proporcionado por la empresa contratante.

En la Figura 8, en el detalle de la tubería de color rojo se observa una válvula proporcional, y un sensor de temperatura (TT200), esta última forma parte del lazo de control, junto una válvula proporcional y un sistema de control, que en este caso es el PLC que se va a utilizar.

Tabla 1. Datos correspondientes al vacío requerido para una determinada temperatura de ebullición. [1]

Punto °C ebullición	Vacío m WG	corresp. a Mm HG abs	M sobre nivel mar	Volumen de vahos de agua
100	0	760	0	1,7 m^3/kg
85	4,5	434	5200	2,8 m^3/kg
70	7,2	233	10000	4,8 m^3/kg
60	8,3	149	14000	7,7 m^3/kg
50	9,1	92	18000	12,0 m^3/kg
40	9,6	55	22000	19,6 m^3/kg

Como ya se ha mencionado anteriormente, la temperatura de evaporación depende del vacío generado dentro del evaporador, en la Tabla 1 se muestra la correspondencia de la temperatura de ebullición con respecto a la presión de vacío, si se observa la columna donde se muestra la temperatura en mm Hg y se relaciona con la columna de donde se muestra el punto de ebullición se nota que a menor presión menor temperatura de ebullición, y por tanto aumenta el vacío, explicado en otras palabras para aumentar el vacío es necesario reducir la presión, con ello el liquido, en este caso la el agua presente en la leche, se evapora a una temperatura menor.

En el caso de la empresa contratante se requiere que dicha temperatura no sea superior a lo 70 grados en la primera etapa, ya que una temperatura mayor a esta produciría que la leche se desnaturalice y por consiguiente se degraden las proteínas presentes en la misma durante un tiempo largo de exposición, este tiempo es programado entre 1 hora y 1,5 horas, para el primer efecto.

3.2. Descripción del Hardware a utilizar

En esta sección se explica el detalle del hardware utilizado en la implementación de la solución de control del sistema de evaporación.

3.2.1 Controladores programables PAC y PLC

En la industria se requieren en numerosas ocasiones controlar motores, válvulas y procesos en general, sumado a esto cálculos, operaciones matemáticas complejas, manejar señales provenientes de sensores. Un PAC es capaz de realizar estas tareas incorporando las funciones de un PLC, con la diferencia que puede ser programado de múltiples maneras, el actual diseño de estos dispositivos los ha hecho muy poderosos en cuanto a su capacidad de procesamiento y conectividad con diferentes fuentes de información.

Los PLC de hoy en día pueden comunicarse por una gran variedad de protocolos de comunicación como DeviceNet, ControlNet, Profibus, Modbus Ethernet, Modbus RTU, entre otros; o de manera serial con estándares como RS-232, RS-485, RS-422, entre otros.

También poseen la capacidad de interactuar con el mundo por medio de módulos de entrada o salida, que dependiendo del modelo pueden manejar diversos tipos de señales, en muy común que para señales de entrada o salida se utilicé como referencia una corriente entre 4 y 20 mA, esto debido a que una señal de corriente es mas robusta con respecto a ruido, ya que el ruido es una señal de tensión que se suma a la señal del sensor en la línea del transmisor, por lo que se mantiene una corriente constante, por mas que se añada una señal de tensión al final de la línea de transmisión del sensor se tendrá la misma corriente.

En la implementación de este proyecto se trabajara con hardware de Rockwell Automation Allen Bradley en este caso Compactlogix 1769 L32E como procesador central, además de los módulos de entrada y salidas tanto digitales

como analógicos, las entradas analógicas son necesarias para la lectura de los valores de los sensores.

3.2.2 Sensores y transmisores de señal

Por medio de los sensores y transmisores de señal se realiza de medición en un sistema de control, esta es necesaria para llevar a cabo las acciones de control. El sensor se encarga de convertir una magnitud física en una señal eléctrica de tensión o corriente; el transmisor, se encarga de llevar esta señal hasta el equipo que realiza la acción de control.

Cuando se utilizan sensores un aspecto importante es lo que llamamos escalamiento, con este se relaciona la magnitud física y la señal eléctrica, por medio de una ecuación, que en la mayoría de los casos es lineal, para esta caso se relaciona el valor mínimo y máximo de la medición del sensor con un valor mínimo y máximo de una referencia eléctrica, la cual puede ser de corriente o de tensión.

Entre las señales que se manejan se encuentran las eléctricas o electrónicas, las cuales puede ser de corriente (4 a 20mA), o de tensión (0 a 10 V, 1 a 5 V), también existen las magnitudes discretas, las cuales son representadas por dos estados, uno o cero.

Los sensores más comunes utilizados en los procesos de la industria actual, son los de presión, flujo, temperatura y nivel. Una de las características principales de un sensor es la ganancia, esta relaciona la señal eléctrica con un porcentaje de apertura de la válvula obtenido por el flujo máximo a través de la variable Cv dada en la hoja de datos de la válvula, tal como se muestra en la ecuación 3.1.

$$K_T = \frac{Rango\ salida}{Rango\ entrada} \qquad \textbf{[3.1]}$$

La respuesta dinámica de la mayoría de los sensores-transmisores es lo suficientemente rápido por lo que puede ser representado por un sistema de primer orden, ya que las constantes de tiempo muerto se pueden despreciar, la expresión matemática que representa al sensor se muestra en la ecuación 3.2.

$$G(s) = \frac{K_T}{\tau \cdot s + 1} \qquad \textbf{[3.2]}$$

Donde:

K_T: Ganancia del transmisor.

τ: Constante de tiempo del transmisor.

3.2.3 Válvulas de control

Cuando se requiere realizar el control de un flujo variable, es necesario utilizar elementos que sean capaces de variar en un porcentaje su apertura para poder así manejar el caudal que pasa por ellos, en el caso de las válvulas de control el control se realiza por una señal eléctrica que se traduce en un porcentaje de apertura en la válvula.

3.2.3.1 Respuesta dinámica de la válvula

Una válvula de control del tipo proporcional en su caso ideal se puede modelar como una constante que relaciona la señal de entrada con respecto a un porcentaje de apertura en la válvula, esta constante incluye la característica de caudal y se le conoce con Kc, su relación se observa en la siguiente ecuación:

$$K_C = \frac{Variacion\ de\ caudal}{Variacion\ de\ carrera} \qquad \textbf{[3.3]}$$

La otra constante involucrada es la del actuador la cual relaciona la señal eléctrica con la característica de caudal, y se le conoce como Kv. La función de transferencia de la válvula incluye un tiempo de retardo en el transductor del actuador, la ecuación completa queda de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K_V}{\tau_V \cdot s + 1} \qquad \textbf{[3.4]}$$

Donde:

K_v: ganancia de la válvula.

τ_v: Constante de tiempo de la válvula.

Básicamente hay cuatro características de caudal:

- Lineal
- Igual porcentaje (50:1)
- Parabólica modificada
- Apertura rápida

Estas se pueden observar en la siguiente figura, en ella se muestran las curvas de respuesta de las válvulas de control:

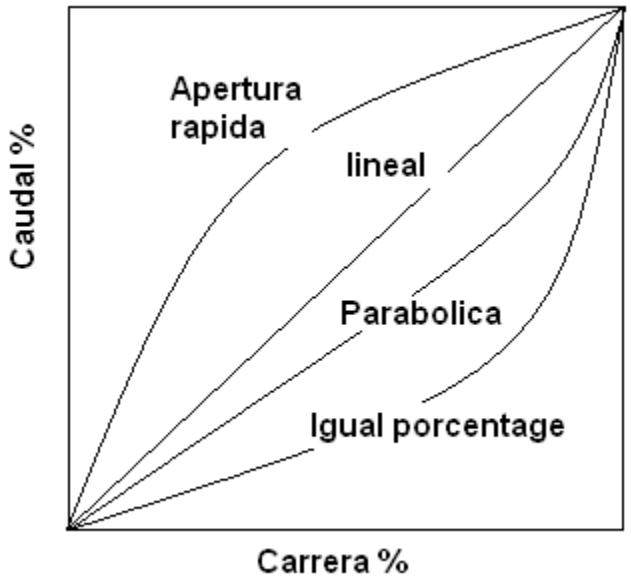

Figura 9. Detalle las regiones de operación de una válvula de control, característica de caudal.

3.3. Descripción del Software a utilizar

Cuando se trabaja con algún tipo de controlador, es necesario que se tenga un entorno de desarrollo, en el cual se pueda llevar a cabo la aplicación, en el caso de los controladores se la línea de Allen Bradley mas nuevos se cuenta con el software RSlogix 5000.

3.3.1 Software de desarrollo RSlogix 5000

El software RSlogix 5000, es un entorno de desarrollo en el que se integran las herramientas de programación necesarias para implementar diversas aplicaciones con lo controladores de la línea Allen Bradley de Rockwell.

Entre sus características esta que poseen diversas formas diversas opciones para programar los controladores, entre las cuales están: escalera, diagramas de flujo, texto estructurado y conexión por bloques.

3.4. Control automático

El termino control automático, según la teoría, involucra tener un valor o magnitud dentro de un rango deseado o lo mas cercano a un valor constante, el cual puede ser dado por una consigna de entrada, en la actualidad el control de procesos involucra una extensa lista de magnitudes como lo son: caudal, temperatura, corriente, tensión, velocidad, nivel, presión, potencia, viscosidad, concentración, entre otros. Otro detalle es que la interacción con el mundo real es analógica o continua, y el control de variables físicas involucra sistemas que pueden ser estables por naturaleza, al igual que existen otros que son inestables, en los primeros es necesario simplemente hacer un diseño de controlador para alcanzar el valor de la consigna en un tiempo determinado, sin embargo en el segundo es necesario estabilizar primero el sistema y luego buscar llegar al valor de la consigna o referencia.

En la práctica a la hora de diseñar un control se debe tener conocimientos físicos y matemáticos del proceso a modelar, así como de la tecnología con la que se va a implementar el control, se debe tener en cuenta que una regulación eficiente debe ser rápida, precisa y sin oscilaciones, con el objetivo de corregir las desviaciones antes de que aparezcan.

3.4.1 Control en lazo cerrado y función de transferencia

Se tiene un control en lazo cerrado, cuando un sistema recibe realimentación, y utiliza esta para ajustar la salida con base en el seguimiento de una referencia o valor deseado, para realizar un control se necesitan principalmente sensores, que son los que convierten las magnitudes físicas en señales eléctricas, y actuadores que hacen el trabajo contrario a un sensor, es decir convierten señales eléctricas en magnitudes físicas con las que se puede llevar la acción de control del sistemas.

En la actualidad los sensores industriales incorporan toda la electrónica necesario para el tratamiento de la señal, y garantizar que esta sea lo mas fiel y estable posible.

En la Figura 10 se observa el diagrama de bloques general de un sistema con un control a lazo cerrado.

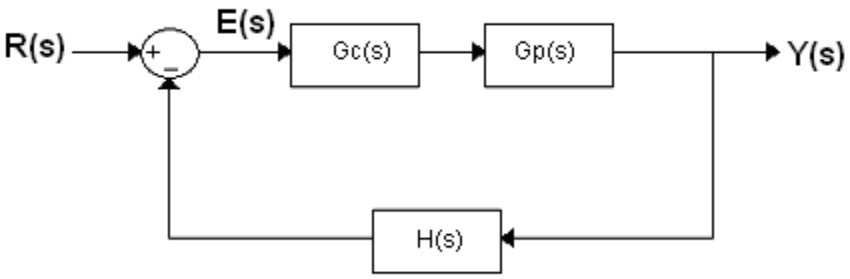

Figura 10. Diagrama de bloques del control a lazo cerrado.

Del diagrama de bloques anterior se tiene:

R(s): Señal de entrada.

E(s): Señal de error.

Y(s): Señal de salida.

H(s): Función de transferencia de realimentación.

G_C(s): Función de transferencia del regulador o controlador.

G_v(s): Función de transferencia de la planta a controlar.

La ecuación de la función de transferencia del sistema en lazo cerrado es la siguiente:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_C(s) \cdot G_v(s)}{1 + G_C(s) \cdot G_v(s) \cdot H(s)} \quad \textbf{[3.5]}$$

En la industria actual, el método más conocido y utilizado es el regulador PID (proporcional, integral y derivativo) y sus variantes, las cuales puede ser PI, P, o PID. Básicamente se pueden utilizar diversos métodos teóricos y empíricos para realizar el diseño de un controlador de este tipo, entre los métodos utilizados están el método de sintonización por medio de la curva de reacción de Ziegler-Nichols, método de asignación de polo arbitrario, compensadores de atraso y de adelanto, básicamente los controladores PID se conformen de tres partes que reciben el nombre de constante proporcional (K_p), integral (K_i) y derivativa (K_d), definen el comportamiento del regulador.

3.4.2 Método de curva de de reacción de Ziegler-Nichols

Gracias a este método se pueden encontrar las constantes del controlador PID de manera gráfica, mediante la curva de reacción del sistema en lazo abierto, este método es utilizado cuando la planta cuenta con un tiempo muerto, provocado por algún retardo en la reacción.

El proceso consiste en trazar la recta tangente al punto de inflexión, de la cual se obtiene el valor de T y el de L al eje temporal tal como se observa en la Figura 11.

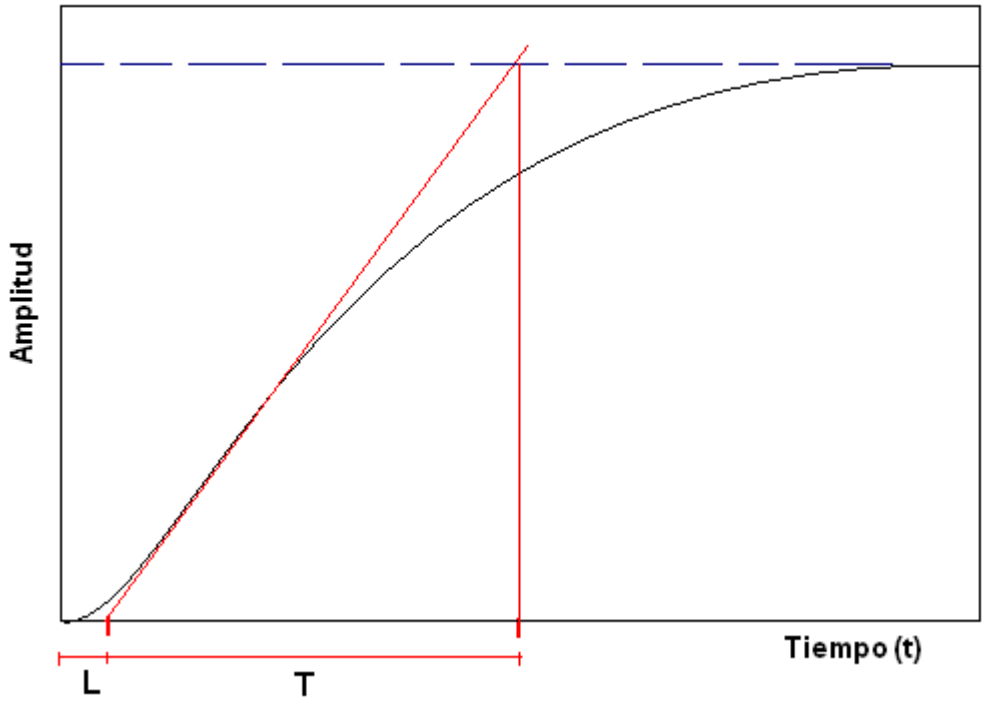

Figura 11. Gráfico en el que muestra como encontrar las constantes T y L.

Con base en la determinación gráfica de las constantes T y L, se utilizan las siguientes ecuaciones para determinar cada uno de los valores de las constantes del controlador PID:

$$Gc = K_P\left(1+\frac{1}{T_i s}+T_d s\right) \qquad \textbf{[3.6]}$$

Con base en los datos de la siguiente tabla se calculan los valores adecuados para cada una de las constantes de la ecuación 3.6.

Tabla 2. Cálculos para determinar constantes en controladores P, PI y PID.

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	**T/L**	**0**	**0**
PI	**0.9T/L**	**L/0.3**	**0**
PID	**1.2T/L**	**2L**	**0.5L**

3.4.3 Controlador de atraso o PI

El controlador PI también conocido como compensador de atraso, corrige la desviación asociada a un controlador proporcional, este es utilizado para mejorar el comportamiento del sistema ante cambios rápidos en el proceso a controlar.

Por medio de una constante de integración τ_i se corrige el error, esta indica que mientras este presente el término de error el controlador se mantendrá cambiando su respuesta y, por lo tanto, realizando una integral del error para lograr eliminarlo. El controlador se mantendrá realizando la integral del error hasta que este desaparezca de la salida.

$$G_C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s}\right) \qquad \textbf{[3.7]}$$

En donde:

$G_C(s)$: Función de transferencia del controlador PI.

K_p: Constante proporcional.

τ_i: Constante de tiempo o de integración.

Capítulo 4. Procedimiento Metodológico

En el siguiente capitulo se presenta aspectos como el reconocimiento y definición del problema, así como el método que se utilizo para llegar a la solución del mismo según los requerimientos de la empresa contratante.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

Como ya se menciono anteriormente, la empresa contratante, posee un equipo de evaporación que carecía de un sistema de regulación y control basado en las necesidades actuales de soporte y mantenimiento, debido a esto, por medio de un contrato se le solicita a la empresa SIQ S.A, Sistemas IQ, realizar la modernización de dicho sistema, esto debido a que la inversión en un nuevo sistema de evaporación es muy alta, sumado a los costos de instalación, y los paros en producción.

Como todo esta estipulado en un contrato, existen una serie de requerimientos para la implementación del control de los lazos, para ello se ha trabajado en conjunto con ingenieros de la planta, para la determinación de dichos requerimientos.

4.2 Obtención y análisis de información

Una parte importante en la obtención de información, es conocer el proceso de evaporación muy bien, es por ello que la experiencia de los ingenieros y técnicos de planta es de suma importancia, para ello por medio de correos y de reuniones con el ingeniero a cargo del proyecto por parte de SIQ, sistemas IQ, se realizo un documento que muestra la descripción operativa del sistema.

Posterior a tener una idea clara de que es lo que debía hacer el sistema de evaporación, se procedió a hacer la investigación correspondiente para diseñar el control de los dos lazos requeridos el de presión de vapor y el de vacío, para ello determinar las características de los actuadores y sensores que necesitan para que el sistema de evaporación funcione correctamente, esto sumado a una

investigación sobre el funcionamiento y operación de los equipos de evaporación para tener una base con la cual empezar el diseño de los lazos de control.

4.3 Implementación de la solución

Con base en la información que se recopilo se procedió a realizar un correcto análisis de la mejor forma de implementar el control de ambos lazos en el sistema de evaporación, para ello se separo la implementación en las siguientes etapas:

a) Recolección de información acerca del proceso de evaporación.

En este se llevo acabo, la recolección de información acerca de como se comportan los sistemas de evaporación, con el objetivo de realizar un diseño adecuado en los lazos de control del sistema.

b) Búsqueda de métodos de modelado de válvulas y sensores.

Estos métodos se describen en el marco teórico, hay que tener en cuenta como es el comportamiento de cada uno de los dispositivos, para que así el sistema de control a diseñar se comporte de manera adecuada.

c) Elección del controlador lógico programable según requerimientos de la empresa contratante.

En este caso se ha de elegir un controlador que sea robusto en cuanto, pero a su vez sea de un precio accesible, ya que la aplicación no amerita un controlador de amplias dimensiones.

d) Diseño de los reguladores o compensadores.

Luego de realizado el modelado de las válvulas y los sensores, se debe hacer un diseño de los compensadores que se utilizaran en el control de los lazos del sistema de evaporación.

e) Simulación de los lazos de control en un software de análisis matemático, como scilab.

Una vez que se tiene el diseño completo, se debe realizar una comprobación de que el control es el adecuado, esto gracias a una simulación del sistema y los controladores en un software de simulación y análisis.

f) Incorporación de los controladores al programa del PLC a utilizar.

La última etapa del proyecto es programar los bloques funcionales en un controlador o PLC de la Marca Allen Bradley de Rockwell Automation.

Capítulo 5. Descripción detallada de la solución

En el siguiente capitulo se explica detalladamente como se llego a la solución, según cada una de sus etapas, se abarcan temas como el modelado de los elementos que forman parte de los lazos, así como del diseños de los compensadores, además del software y hardware utilizado en el proceso.

5.1 Análisis de las características principales de la solución

Como ya se menciono anteriormente, se necesita controlar un sistema de evaporación, el cual es el encargado, de extraer el agua de la leche para producir un concentrado, en este caso se obtiene leche condensada, la cual es homogenizada en etapas posteriores a la de evaporación.

El principio del evaporador se basa en aplicar una presión de vapor dentro de una calandria, el calor proveniente del vapor y la presión del mismo hace que el agua en el liquido dentro de los tubos de la calandria se evapore, a su vez la temperatura de ebullición depende directamente de la condición de vacío que exista dentro de la cámara de evaporación, es por ello que para el funcionamiento del proceso de evaporación es necesario controlar la presión de vapor así como el vacío en el que se encuentra el sistema.

5.2 Descripción del hardware utilizado para el sistema de control

Para poder definir la parte que corresponde al hardware a utilizar, es necesario conocer los requerimientos por parte de la empresa contratante. Para ello determinar si el sistema es suficiente para realizar un dimensionamiento adecuado del equipo que no sobreestime el costo del sistema de control del evaporación.

Haciendo un resumen de los requerimientos del sistema se tienen los siguientes:

- El suministro de vapor debe estar en el rango de 10-12 Kg./cm^2 de presión tanto para el I como para el II efecto.

- La temperatura de evaporación no debe ser mayor a 75 grados, para evitar la separación de grasas, lo ideal es que esta se encuentre entre 52 y 58°C en el segundo efecto, este se acostumbra tener un valor de 60 °C.

- Utilizar una condición de vacío según la tabla 1 para poder mantener la temperatura de evaporación de 60 grados en el segundo efecto, el flujo de agua de enfriamiento es configurable por el usuario entre 0 y 5 l/s.

- Manejo de señales analógicas provenientes de sensores las cuales son de corriente entre 4 y 20 mA.

- Manejo de válvulas proporcionales por medio de módulos de salida que suministren señales de corriente entre 4 y 20 mA.

- Respaldo en cuanto a garantía y soporte del equipo instalado.

Dados lo requerimientos anteriores se opto por utilizar un procesador de la línea CompactLogix, estos procesadores son económicos, y con características suficientes para cumplir con los requerimientos de control, en la Tabla 3 se muestra el procesador utilizado para la aplicación.

Tabla 3. Características del controlador lógico programable a utilizar.[1]

Modelo	Características
CompactLogix 1769-L32E	- Memoria 512 kB. - Capacidad de manejar hasta un total de 30 módulos locales de entradas y salidas (digitales y/o analógicas). - Puertos de comunicación Ethernet/IP y RS-232 integrados. - Manejo de bloques de control PID predefinidos. - Posibilidad de programación en diferentes lenguajes, como bloques, diagramas de flujo, texto estructurado.

El controlador 1769-L32E, es un procesador robusto que entre sus características tiene la posibilidad de ampliación, en el caso de los

[1] Tabla basada en las características obtenidas de la hoja de datos del controlador proporcionada por Allen Bradley como marca registrada de Rockwell Automation.

requerimientos, es necesario incorporar dos válvulas proporcionales, una para controlar el flujo de vapor, y otra para controlar lo que seria la parte de vacío, se necesita un módulo de lectura de RTD que convierta la lectura de resistencia en una señal de 4 – 20 mA, y un módulo de entrada analógica para la lectura del sensor de presión de la parte de vacío.

En este procesador se han de programar los dos bloques control de los lazos necesarios para la operación del evaporador.

5.2.1 Acondicionamiento de la señal del sensor de temperatura.

El sensor de temperatura utilizado es del tipo RTD, este tipo de sensores cambian su valor de resistencia según la temperatura registrada, el tipo de RTD ha utilizar es PT100, de la marca Rosemount, con la misma se pueden obtener valores entre de temperatura según el tipo de material con el sea construido, la misma es de la serie rosemount 68 con los que el rango de medición de temperatura varia, según su hoja de datos va desde los 0°C a 200°C para un código V2 como se observa en la Figura 12 .

OPTION CODE "V" CALLENDAR-VAN DUSEN CONSTANTS

Option Code	Temperature Range		Calibration Points		Uncertainty[1] of Calibration Lab		Total Uncertainty[2] of Calibrated Sensor					
							Series 68		Series 78 Standard		Series 78 High Temperature	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
V1[3]	0 to 100	32 to 212	0	32	±0.03	±0.05	±0.06	±0.11	±0.06	±0.11	±0.06	±0.11
			100	212	±0.08	±0.14	±0.10	±0.18	±0.10	±0.18	±0.10	±0.18
V2[3]	0 to 200	32 to 392	0	32	±0.03	±0.05	±0.10	±0.18	±0.09	±0.16	±0.10	±0.18
			100	212	±0.08	±0.14	±0.22	±0.40	±0.15	±0.27	±0.23	±0.41
			200	392	±0.13	±0.23	±0.16	±0.29	±0.15	±0.27	±0.16	±0.29
V3[3]	0 to 400	32 to 752	0	32	±0.03	±0.05	±0.20	±0.29	±0.16	±0.29	±0.20	±0.29
			200	392	±0.13	±0.23	±0.42	±0.76	±0.29	±0.52	±0.44	±0.79
			400	752	±0.23	±0.41	±0.30	±0.54	±0.28	±0.50	±0.30	±0.54
V4[3][4]	0 to 600	32 to 1112	0	32	±0.03	±0.05	NA	±NA	NA	NA	NA	NA
			200	392	±0.13	±0.23	NA	±NA	NA	NA	NA	NA
			400	752	±0.23	±0.41	NA	±NA	NA	NA	NA	NA
V5[3]	–50 to 100	–58 to 212	0	32	±0.03	±0.05	±0.08	±0.14	±0.06	±0.11	±0.09	±0.16
			100	212	±0.08	±0.14	±0.10	±0.18	±0.10	±0.18	±0.10	±0.18
V6[3]	–50 to 200	–58 to 392	–50	–58	±0.06	±0.10	±0.14	±0.25	±0.11	±0.20	±0.14	±0.25
			0	32	±0.03	±0.05	±0.20	±0.36	±0.14	v0.25	±0.21	±0.38
			100	212	±0.08	±0.14	±0.26	±0.47	±0.18	±0.32	±0.27	±0.49
			200	392	±0.13	±0.23	±0.18	±0.32	±0.16	±0.29	±0.17	±0.3

Figura 12. Tabla con los rangos de temperatura para diferentes RTD Rosemount[2].

Para lograr una correcta lectura de la RTD existen en el mercado diversos módulos de conversión tal es el caso de los WeidMueller, en estos existe el módulo de conversión de RTD a una señal de 4 a 20 mA. Y con ello inyectar la señal al módulo de entradas analógicas del CompactLogix, se debe recordar que una señal de corriente es mas robusta ante el ruido que una señal de tensión, en la Figura 13 se observa el diagrama, y el aspecto físico del convertidor de RTD a una señal de 4 a 20mA.

[2] Tabla tomada de la hoja de datos de una RTD marca Rosemount PT100

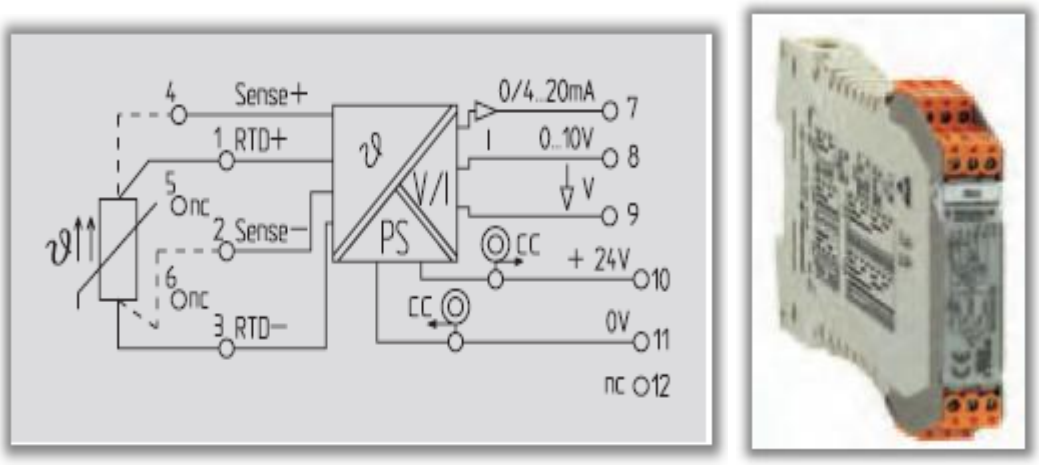

Figura 13. Diagrama del convertidor PT100/RTD Weidmueller y aspecto físico del mismo.

En este mismo módulo convertidor se puede obtener una señal de tensión, y se pueden conectar RTD de 2, 3, 4 hilos, dependiendo de como se configure. En la Figura 14 se observa la configuración del módulo según la posición de los interruptores que posee el módulo rotulados a un costado, para este caso se tiene que configurar el convertidor para una RTD de dos conductores, tipo PT100 y que tenga una respuesta rápida, con una salida de 4 a 20 mA.

WAVEANALOG PRO RTD

Switch positions/possible settings

Selection of input

■ = on
□ = off

Input	Switch 1		
	1	2	3
PT100 2-conductor	■	■	■
PT100 3-conductor	□	■	■
PT100 4-conductor	■	□	■
R 2-conductor	□	□	■
NI100 2-conductor	■	■	□
NI100 3-conductor	□	■	□
NI100 4-conductor	■	□	□
Potentiometer	□	□	□

WAVEANALOG PRO RTD 1000

Switch positions/possible settings

Selection of input

■ = on
□ = off

Input	Switch 1		
	1	2	3
PT1000 2-conductor	■	■	■
PT1000 3-conductor	□	■	■
PT1000 4-conductor	■	□	■
R 2-conductor	□	□	■
NI1000 2-conductor	■	■	□
NI1000 3-conductor	□	■	□
NI1000 4-conductor	■	□	□
Potentiometer	□	□	□

Selection of output

Output	Switch 2	
	6	7
0...10V	■	□
0...20mA	□	□
4...20mA	□	■

Switching on the manual adjustment

manual adjustment	S.1
	8
off	□
on	■

Selection of the step response

step response	S.2
	8
slow	■
fast	□

Figura 14. Configuración del convertidor PT100/RTD Weidmueller por medio de los Dip-Switch que posee.

5.2.2 Válvulas proporcionales para el control de flujo de vapor y caudal de agua de enfriamiento.

En el caso de las válvulas de control, se requiere manejar la apertura de la misma por medio de una señal de 4 a 20 mA, por medio de un módulo de salida del PLC, esta a su vez creara un flujo de vapor proporcional a la carrera de la válvula.

En la Figura 15 se muestra la distribución del Rack principal de control, en el mismo se observa un módulo 1769-OF8C, este módulo cuenta con 8 salidas analógicas configurables, las cuales pueden funcionar por corriente o por tensión, en el caso del manejo de válvulas proporcionales se elige controlar las mismas con una señal de corriente por ser robusta ante el ruido. Dos entradas de este módulo van a ser utilizadas para el control de las válvulas.

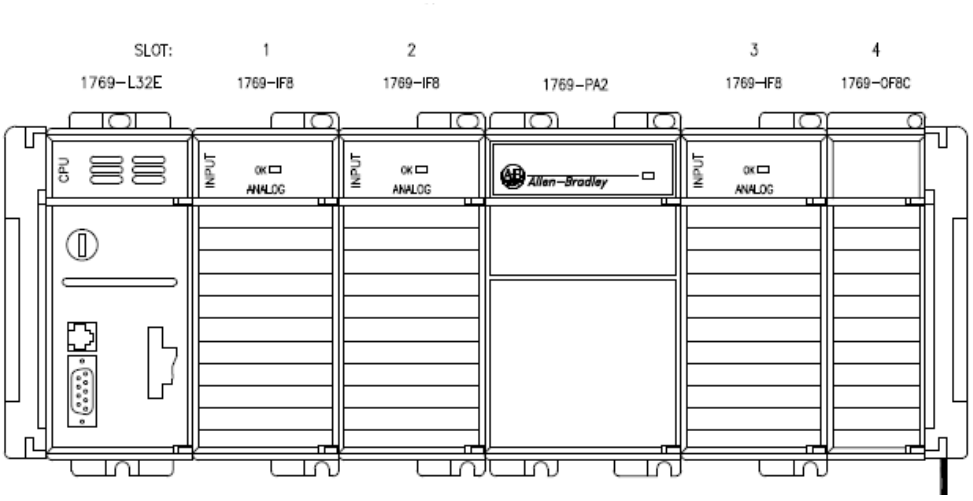

Figura 15. Detalle del Rack principal de control, y los módulos utilizados.

En este mismo rack se observan tres módulos de entrada analógicos 1769-IF8, en total se sumarian 24 estradas analógicas, pero en el caso del sistema de control a implementar se utilizaran dos entradas para la lectura de los sensores correspondientes.

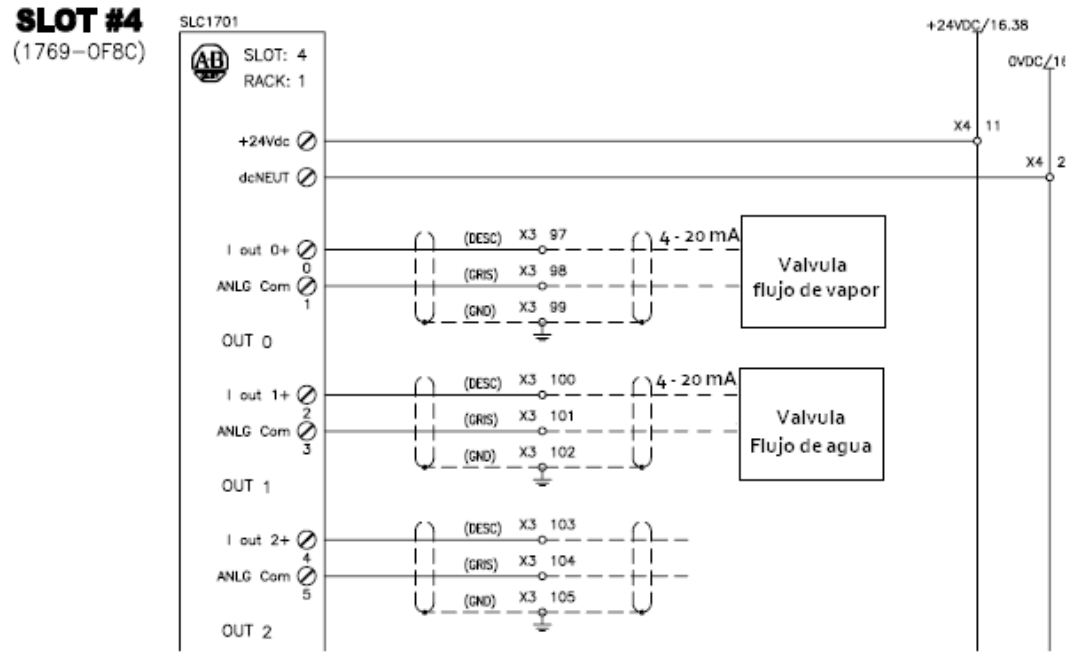

Figura 16. Diagrama de conexión según el plano de SIQ.

En la Figura 16 se muestra la interfaz según el plano con las terminales de cada una de las válvulas, las cuales corresponden a la válvula de flujo de vapor para el lazo de control de temperatura, la válvula de flujo de agua de enfriamiento para el condensador de salida con el que se controla la condensación del vapor y por ende el vacío dentro de la calandria.

5.3 Implementación de los lazos de control.

En esta sección se hará una descripción detallada acerca de la implementación de los lazos de control involucrados en el sistema de evaporación. También se incluirán descripciones de los dispositivos utilizados así como los modelos teóricos y matemáticos que describen el funcionamiento de los lazos en el control del equipo de evaporación.

En la Figura 17 se muestra el plano del evaporador suministrado por la empresa contratante, en el mismo se observa el detalle de los lazos de control, la tubería

roja es la de vapor y la pequeña en la etapa de salida donde se encuentran los termocompresores, es la de enfriamiento, el sistema por medio de lazo de control de flujo de agua, controla la condensación dentro de la parte de salida y con ello convertir los vahos proveniente de la evaporación en condensados y así liberar la masa que esta dentro de la calandria con lo que se provoca un vacío.

El lazo de vapor controla la temperatura de evaporación de la leche, por medio de la transferencia de energía del vapor hacia el metal y posteriormente a la leche, la cual a una temperatura adecuada, y a causa de la recirculación se convierte en un concentrado, luego de una etapa de Homogenización se convertirá en leche condensada.

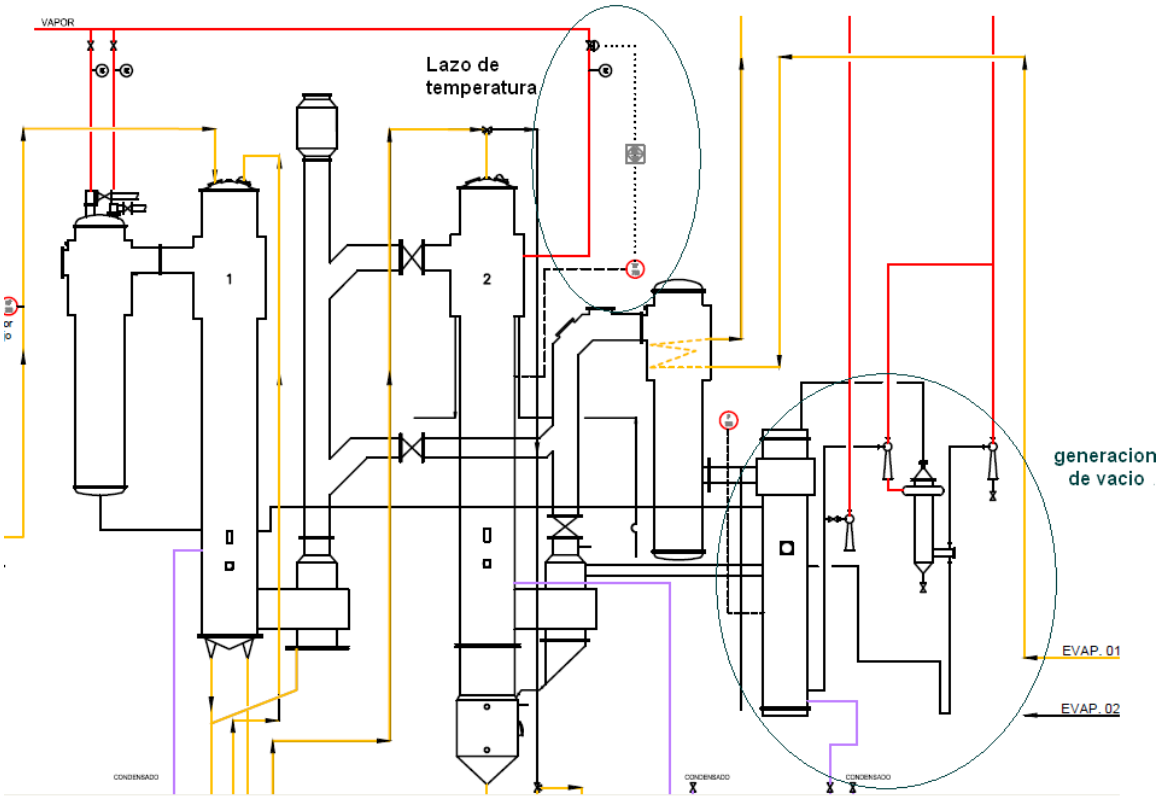

Figura 17. Diagrama del evaporador scheffer y vista de los lazos de control de vapor y agua de enfriamiento.

5.3.1 Lazo de control de temperatura en el efecto II.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el evaporador por medio del lazo de vapor logra reducir el contenido de agua en la leche aumentando la concentración, el calor provocado por el flujo de vapor es transferido al interior de la calandria provocando que el agua contenida en la leche sea evaporada al llegar a su punto de ebullición, las condiciones optimas para lograr la evaporación dentro de la calandria según las condiciones de vació, son que esta no debe sobrepasar los 75 °C, pero lo recomendable es que esta opere entre 52 y 58 °C para el segundo efecto.

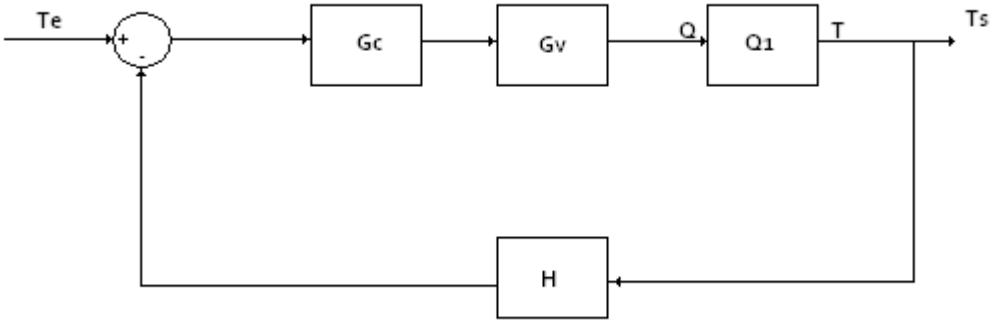

Figura 18. Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura en la calandria.

En la Figura 18 se observan el diagrama de bloques que muestra la estructura del lazo de control de temperatura en el segundo efecto del evaporador, donde:

Gc: Función de transferencia del controlador
Gv: Función de transferencia del actuador o válvula
Q1: Función de transferencia de calor del vapor al liquido en la calandria.
H: Función de transferencia del sensor de temperatura.

Como primer paso se necesita encontrar las expresiones de las ecuaciones que tienen que ver con los dispositivos involucrados, los cuales corresponden a H,

Gv, y Q1. El segundo paso es hacer el cálculo correspondiente del controlador, Gc.

5.3.1.1 Función de transferencia de la válvula de flujo de vapor.

Como se menciono en la sección 3.2.3, la válvula de manera ideal se modela como una función de la carrera y el caudal en la válvula, como lo que se va a controlar es un flujo a través de una tubería se utilizara una relación lineal para el control de la válvula, existe una constante llamada Cv, la cual se le conoce como el coeficiente de flujo de la válvula, esta relaciona el caudal de salida con la acción de la señal eléctrica sobre la válvula, el Cv es proporcionado en la hoja de datos de la válvula, este valor posee unidades .

Para el control del flujo de vapor a través de la tubería de 1.5 pulgadas se tiene una válvula Fisher® Baumann™ 24000C, la siguiente ecuación se encuentra en la hoja de datos de la válvula:

$$K_V = 0{,}86 \cdot C_V$$

En la misma se observa la relación de coeficiente de flujo de la válvula dado en [gpm][psi] con respecto a la ganancia de transmisión dada en [m3/h][bar], cuando la presión diferencial en los extremos de la válvula es constante, la relación entre la carrera del pistón y el caudal de la válvula es proporcional o lineal, en la Figura 19 se observa un diagrama de bloques donde se estructura el modelo de la válvula.

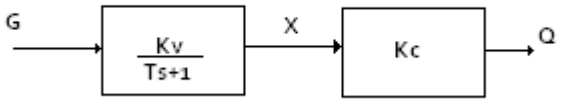

Figura 19. Diagrama de bloques del modelo de la válvula.

En la figura anterior se observa que la válvula consta de un variable G de entrada la cual es proporcionada por la señal eléctrica de control, seguido de

este se encuentra la característica de comportamiento, la cual se basa en un sistema de primer orden, y donde Kv nos da la relación de flujo de la válvula cuando la válvula se encuentra abierta en su 100 %, y por ultimo Kc es la relación que existe entre la variación de la carrera y el caudal de salida de la válvula.

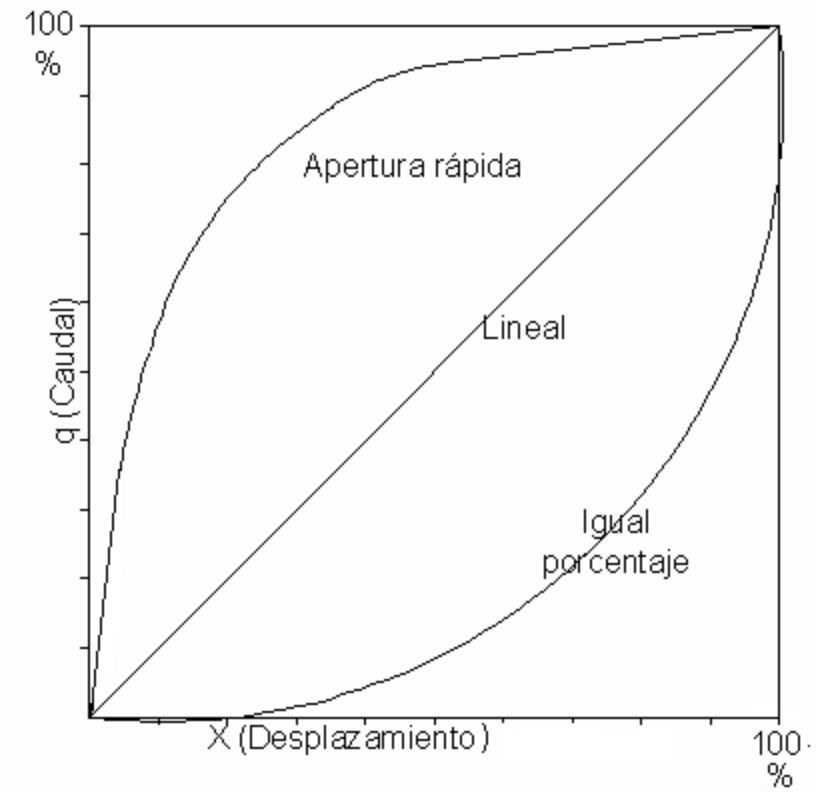

Figura 20. Relación entre el desplazamiento y el caudal de la válvula.

En los casos de presión diferencial constante en la válvula, la variable Kc hace que la relación entre caudal y desplazamiento sea igual a la función identidad, así que en este caso lo indicado es encontrar el valor de flujo máximo en la válvula con respecto al coeficiente de flujo Cv, y hacer la conversión utilizando la constante que provee el fabricante. En la Tabla 4 se muestra la tabla con los valores de Cv con los que cuenta una válvula bauman fisher 24000C.

Tabla 4. Tabla con los datos de Cv para la válvula 24000C.[3]

Cv Values at 100% Plug Opening (Kv = 0.86 x Cv)

VALVE SIZE	ORIFICE DIAMETER	PLUG TRAVEL	PLUG SERIES				
			102	577	548 / 588	677	648 / 688
NPS	inch	inch	Cv	Cv	Cv	Cv	Cv
1/2 3/4 1	0.25	0.5	0.02 0.05 0.1 0.2	---	0.2 0.5 1.0	---	0.5 1.0
	0.375	0.5	---	1.0 1.5 2.5	1.5 2.5	0.1 0.2 0.5 1.0 2.5	1.5 2.5
1/2	0.8125	0.5	---	4 6	4 7.7	5	4 6
3/4	0.8125	0.5	---	4 7.5	4 10.1	5	4 8
1	0.8125	0.5	---	4 8.5	4 10.1	5	4 9
	1.0625	0.5	---	13	13.6	---	13
1–1/2	1.25	0.75	---	20	10 20	20	10 20
	1.5	0.75	---	10 17 28	10 17 32.9	10 17	10 17 28
2	1.5	0.75	---	10 17 28	10 17 32.9	10 17	10 17 28
	2.0	0.75	---	30	30 52.9	30 50	30 50

Con los datos de la Tabla 5 se tiene los valores de Cv para una determinada serie y un diámetro específico de tubería, como ya se menciono anteriormente el diámetro es de 1.5 pulgadas, la serie de la válvula es 577, con ello se obtiene:

$$K_V = 0{,}86 \cdot C_V$$

$$K_V = 0{,}86 \cdot 28[gpm]$$

$$K_V = 24.08[m3/h]$$

En la Tabla 5 se observan los tiempos de retardo para lo diferentes tipos de trasmisores utilizados en válvulas, el caso de smart rosemount utilizado en las válvulas Fischer, el retardo en la válvula es de 1.130 s , o como se muestra el la tabla de 1130 ms.

[3] Tabla obtenida del manual de usuario para una válvula bauman 24000C proporcional

Tabla 5. Tabla con tiempos de retardo para diferentes tipos de transmisores. [10]

Lazo	A	B	C
Tipo de transmisor	Análogo	Smart (Rosemount)	Digital (fieldbus)
Razón de actualización (Actualizaciones/ s)		5,5	2,7
Tiempo muerto del transmisor (ms)	20	400	700
Tiempo muerto del controlador (ms)	250	250	250
Otros tiempos muertos (ms)	480	480	480
Tiempo muerto total (ms)	750	1130	1680

Con base en estos datos y tomando en cuenta la ecuación del modelo de primer orden de la válvula se tiene lo siguiente:

$$G(s) = \frac{K_V}{\tau_V \cdot s + 1}$$

Realizando la sustitución de valores correspondientes se tiene:

$$G(s) = \frac{24.08}{1.130 \cdot s + 1}$$

$$G(s) = \frac{24.08}{1.130 \cdot (s + \frac{1}{1.130})}$$

El modelo de primer orden para la válvula es el siguiente:

$$G(s) = \frac{21.30}{(s + 0.88)}$$

Ya con el modelo de la válvula queda pendiente el tema del sensor que en este caso es un sensor del tipo RTD.

5.3.1.2 Función de transferencia del sensor de de temperatura.

Como se explico en la sección 5.2.1, el sensor de temperatura es del tipo RTD, y un acondicionador de señal PT100/RTD Weidmueller, en la hoja de datos del mismo se observa el dato de tiempo de retardo de transmisión del módulo el cual es de 1.2 s al ajustar el dip switch S.2 en modo de respuesta Fast (rápido), en la Tabla 6 se muestran los datos técnicos del módulo y en el mismo se observa el Step time respose para la opción Fast.

En el caso de la ganancia del sensor, hay que tomar en cuenta, el efecto de la RTD y el acondicionador de señal, en el caso del módulo utilizado se convierte un valor de temperatura dado por la RTD a un valor de corriente de 4 a 20 mA; la obtención de esta ganancia es necesaria para realizar el escalamiento correspondiente en el PLC.

Tabla 6. Tabla con tiempos de retardo para diferentes tipos de transmisores.

Technical data

Input		
Sensor	PT100/2-/3-/4-cond.; Ni100/2-/3-/4-cond.; potentiometer:	PT1000/2-/3-/4-cond.; Ni1000/2-/3-/4-cond.; potentiometer:
Temperature input range	min. 0…100Ω, max. 0…100kΩ; resitance: 0…450Ω	min. 0-1kΩ, max. 0-100kΩ; resitance: 0-4,5kΩ
	configurable	configurable
Output		
Output current/Output voltage	0(4)…20 mA/0…10 V	0(4)…20 mA/0…10 V
Offset current/Offset voltage	max. 100 µA/max. 0.05 V	max. 100 µA/max. 0.05 V
Load resistance voltage/Current	>= 1 kΩ/< = 600 Ω	>= 1 kΩ/< = 600 Ω
Step response time	fast: 1.2 s/ slow: 2.2 s	fast/slow:2-/3-/4-cond.: 1.2s/2.3s; Poti: 0.5s/1.2s
Line resistance in measuring circuit	50 Ω	50 Ω for 3- and 4-conductor
Influence of cable resistance	max. + 0.25°C at 50 Ω cond. resistance	max. + 0.25°C at 50 Ω cond. resistance
Wire break detection	LED flashes (output value > 20mA, > 10V)	LED flashes (output value > 20mA, > 10V)
Fine adjustment	>=+/-5%, Version 1:>=12.5% / Poti:12.5%...25%	>= +/- 12.5%; Poti: +/- 12.5% ... +/-25%
Status indicator	active: LED on/cond. broken: LED flashing/Error: LED off	active: LED on/cond. broken: LED flashing/Error: LED off
General data		
Supply voltage	24 Vdc +/- 25 %	24 Vdc +/- 25 %
Power consumption	830…880…980mW at Iout=20mA	830…880…980mW at Iout=20mA
Current-carrying cap. of cross-connect.	<= 2 A	<= 2 A
Operation temperature	0 °C...+55 °C	0 °C...+55 °C
Storage temperature	-20 °C...+85 °C	-20 °C...+85 °C
Default settings	PT100/3-cond./ 0…100°C / 4…20mA / man. adjustment: off /	PT1000/3-cond./ 0…100°C / 4…20mA / man. adjustment: off
Approvals	slow step response	/ slow step response

Si se observa la ecuación del modelo de primer orden correspondiente a la respuesta de un sensor, ecuación 2, se tiene la parte que corresponde al tiempo de respuesta del sensor el cual equivale a 1.2 segundos según la hoja de datos técnicos, y con ello se completa el modelo de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K_T}{\tau_T \cdot s + 1}$$

Donde:

$$\tau_T = 1.2s$$

y se tiene que la ganancia del sistema esta dada por:

$$K_T = \frac{Rango\ salida}{Rango\ entrada}$$

$$K_T = \frac{20mA - 4mA}{200°C - 0°C} = 0.08[mA/°C]$$

Así que la ecuación del modelo matemático completa queda de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{0.08}{1.2s + 1}$$

$$G(s) = \frac{0.08}{1.2(s + 0.833)} = \frac{0.0666}{s + 0.8333}$$

5.3.1.3 Función de transferencia de calor del vapor al líquido en la calandria.

En la sección 5.3.1.1 se encontró que la salida del bloque de la válvula tenia como salida un flujo dado en [m3 /h], como siguiente paso lo que se quiere controlar es la temperatura en la calandria, donde se lleva a cabo la evaporación, en este caso es necesario encontrar una relación entre el flujo de vapor y la temperatura en la calandria de evaporación.

Para realizar el correcto análisis de la operación de esta función de transferencia es necesario realizar un análisis de masa y energía, o también conocido como balance de energía, en el esquema mostrado en la Figura 21 se muestran las diferentes variables que interactúan en intercambio de energía en la calandria, donde la variable a controlar es la temperatura del liquido presente en la leche.

Como se observa en la Figura 21, al sistema ingresa una masa o flujo de vapor con una temperatura final, al hacer contacto con el área en los tubos de la calandria se transfiere energía en forma de calor hacia el líquido en el interior, por lo que se debe encontrar una relación matemática para encontrar la temperatura final del liquido presenten en el evaporador.

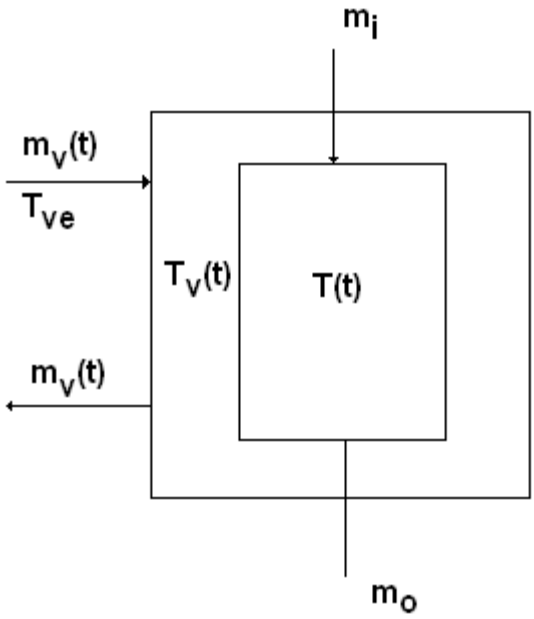

Figura 21. Esquema para el balance de energía en la calandria.

Como primer paso es se necesita hacer un balance de masa de la siguiente forma, este mismo relaciona el vapor que entra en la calandria con el que sale, y la cantidad de energía que transmite al sistema:

La cantidad de vapor de entrada es igual a la que sale:

$$\dot{m}_{VE} = \dot{m}_{VS} = \dot{m}_{V}$$

Donde:

m_{VE}= masa de vapor entrante

m_{VS}= masa de vapor saliente

Para que halla conservación de energía en el evaporador se tiene que:

$$Q_{ENTRA} - Q_{SALE} = m_V c_V \frac{dT_V}{dt}$$

La relación del intercambio de energía entre el vapor vivo, las paredes de la calandria y la película de líquido que se desliza en los tubos es:

$$Q = UA(T_V(t) - T(t))$$

Donde:

$T_V(t) =$ Temperatura del vapor

$T(t) =$ Temperatura de la película delgada del líquido.

U = coeficiente de transferencia de calor en las paredes del evaporador.

A = área de contacto total.

La relación del calor dado un flujo de vapor esta dado por:

$$Q_V = \dot{m}_{VE}(t) \cdot C \cdot T$$

Donde:

$C =$ Capacidad calorífica del vapor

$T =$ Temperatura del vapor.

Realizando las sustituciones correspondientes y tomando en cuenta el calor en el interior del evaporador se encuentra la ecuación diferencial que describe el comportamiento dentro del vapor en el evaporador.

$$\dot{m}_{VE}(t) C_{VE} T_{VE} - UA(T_V(t) - T(t)) = m_V c_V \frac{dT_V(t)}{dt} \qquad \textbf{[5.1]}$$

Esta ecuación representa un sistema de primer orden, y con la misma tenemos la relación entre la energía calorífica cedida por el vapor vivo y la temperatura del líquido que fluye por la calandria del evaporador. Si se observa en la Figura 21, se puede notar que existe un flujo de liquido de entrada mi y uno de salida mo, esto representa la leche que entra en la calandria del evaporador por la parte superior, por lo que la temperatura del liquido esta relacionada también con este flujo, para efectos del proyecto este flujo de leche es constante, sin embargo se debe tomar en cuenta en el modelo matemático del evaporador

completo, ya que si se observa, la ecuación 10 posee 3 variables dependientes del tiempo, mve(t), Tv(t) y T(t).

Para logra reducir a dos variables dependientes del tiempo la ecuación 10, es necesario encontrar una segunda ecuación, para ello se debe analizar lo que ocurre dentro de los tubos de la calandria, en donde se forma la película delgada de leche, se tiene que:

$$E_{ENTRA} - E_{SALE} = E_{acumulada}$$

La energía de entrada en los tubos esta dada por:

$$E_{ENTRA} = E_{vapor} + E_{intercambio}$$

$$E_{ENTRA} = \dot{m}_{LE} C_{LE} T_{LE} + UA(T_V(t) - T(t))$$

y la energía de salida corresponde a la del flujo de salida de la calandria:

$$E_{ENTRA} = E_{flujosalida}$$

$$E_{SALE} = \dot{m}_{LS} C_{LS} T(t)$$

Haciendo la sustitución correspondiente tenemos que:

$$\dot{m}_{LE} C_{LE} T_{LE} + UA(T_V(t) - T(t)) - \dot{m}_{LE} C_{LE} T(t) = m_L c_L \frac{dT(t)}{dt} \qquad \textbf{[5.2]}$$

Las ecuaciones 10 y 11 representan el comportamiento del evaporador, contemplando el intercambio de energía, relacionar matemáticamente ambas ecuaciones es un poco complicado, por lo que una simple sustitución no es suficiente para poder observar el comportamiento, para simplificar el análisis se procederá a realizar un diagrama de bloques que involucre cada una de las componentes de ambas ecuaciones.

Para construir el diagrama de bloque con base en ambas ecuaciones, se procede a realizar la transformada de laplace, y expresarlas en el dominio de "s":

Para la ecuación 11 se tiene que:

$$\dot{m}_{LE} C_{LE} T_{LE} + UAT_V(t) - UAT(t) - \dot{m}_{LE} C_{LE} T(t) = m_L c_L \frac{dT(t)}{dt}$$

Aplicando laplace:

$$\dot{m}_{LE} C_{LE} T_{LE} + UAT_V(s) - UAT(s) - \dot{m}_{LE} C_{LE} T(s) = m_L c_L s T(s)$$

Para la calandria se tiene que la variable de entrada es la temperatura del vapor, la de salida es la temperatura del liquido (agua presente en la leche)

$$\left(\dot{m}_{LE} C_{LE} T_{LE} + UAT_V(s) - UAT(s) - \dot{m}_{LE} C_{LE} T(s) \right) \frac{1}{m_L c_L s} = m_L c_L s T(s) \qquad \textbf{[5.3]}$$

Para la ecuación 10, que relaciona el flujo de vapor con la temperatura del mismo:

$$\dot{m}_{VE}(t) C_{VE} T_{VE} - UA(T_V(t) - T(t)) = m_V c_V \frac{dT_V(t)}{dt}$$

Aplicando laplace:

$$M_{VE}(s) C_{VE} T_{VE} - UAT_V(s) - UAT(s) = m_V c_V s T_V(s)$$

En la ecuación anterior la se necesita como variable de salida la temperatura del vapor:

$$\left(M_{VE}(s) C_{VE} T_{VE} - UAT_V(s) - UAT(s) \right) \frac{1}{m_V c_V s} = T_V(s) \qquad \textbf{[5.4]}$$

Con base en la ecuaciones 12 y 13 se obtiene el diagrama de bloques de la Figura 22, este fue realizado en el software scilab y muestra la interrelación de

cada una de las variables y constantes de sistema de evaporación así como la calandria.

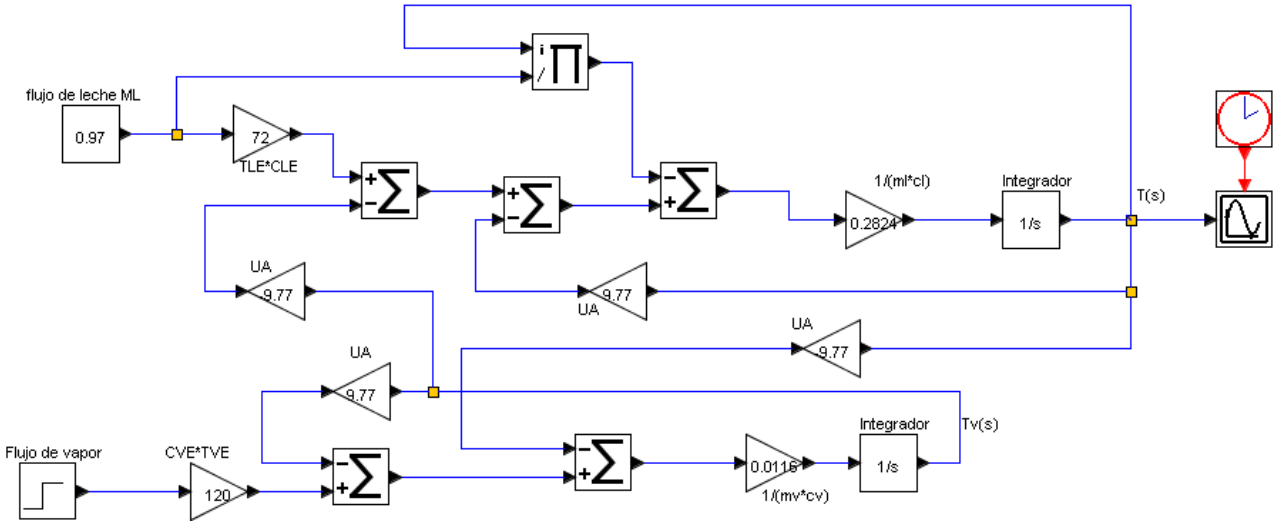

Figura 22. Diagrama de bloques del evaporador.

En Figura 22 se muestran lo valores de cada una de las constantes, el valor de las mismas se obtuvo por medio de los datos correspondientes a un evaporador scheffers y con base en la información de GEA, industria que construye sistemas de evaporación para la industria Láctea. A Continuación se muestra como se calcularon cada una de las constantes involucradas en el proceso de evaporación.

Como primera consigna se tiene que el flujo de leche, es constante, en la descripción operativa se obtiene el dato correspondiente al flujo de leche en los tubos largos de la calandria:

$$\dot{m}_{LE} = \dot{m}_{LS} = 3500 \text{ L/h}$$

Haciendo la conversión a m^3/s:

$$\dot{m}_{LE} = 3500 \frac{L}{h} * \frac{1}{1000} \frac{m^3}{L} * \frac{1}{3600} \frac{h^3}{s} = 0.00097 \frac{m^3}{s}$$

Este flujo dado en Kg/s equivale a:

$$\dot{m}_{LE} = 0.00097 \frac{m^3}{s} * \frac{1000kg}{1m^3} = 0.97 \frac{kg}{s}$$

El calculo del coeficiente de transferencia de calor en las paredes de la calandria del evaporador:

$$U = \frac{Q}{T * A}$$

Donde Q es el calor utilizado en la evaporación, T es la temperatura promedio que del proceso, y A es el área de contacto total en los tubos de la calandria, gracias a la información de GEA evaporation, con la información pertinente a sistemas de evaporación, se tiene que:

$$Q = \dot{m}_{LE} * H_{EVAPORACION} = 0.97 \frac{kg}{s} * 564 \frac{Kcal}{kg} = 547 \frac{Kcal}{s}$$

Con la información de operación propia del sistema se obtiene la temperatura promedio:

$$T = \frac{52°C + 60°C}{2} = 56°C$$

El área total de contacto del vapor en la calandria depende del número de tubos así como la altura del evaporador de película descendente:

$$A = \pi * r^2 * h_{TUBOS} * Numerotubos = \pi * 0.03^2 * 10m * 42tubos = 1.18m^2$$

El cálculo de coeficiente de transmisión de calor en las paredes es:

$$U = \frac{Q}{T * A} = \frac{547Kcal/s}{56°C * 1.18m} = 8.28 \frac{Kcal}{°Csm}$$

El siguiente cálculo es la cantidad de masa que entra en contacto con el vapor dentro de la calandria, la cual esta directamente relacionada con la densidad del agua y el volumen aproximado de la película descendente, el fabricante dice que el ancho de esta película es de 3mm de espesor, con ello se realiza el siguiente cálculo:

$$m_L = V_{TOTAL} * \rho_{AGUA}$$

$$m_L = A_{CONTACTO} * h_{PELICULA} * \rho_{AGUA}$$

$$m_L = 1.18m * 0.003m * 1000\frac{kg}{m^3} = 3.54kg$$

Las constantes correspondientes a las capacidades caloríficas del agua y del vapor son:

$$c_L = 1\frac{Kcal}{kg}$$

$$c_V = 0.8\frac{Kcal}{kg}$$

La temperatura del vapor a la entrada T_{VE} es 150°C, la masa de vapor total que puede estar contenida en el scheffer contenida m_{VE} es 75 kg, además hay que tomar en cuenta que la temperatura de entrada del liquido corresponde a 72°C, la cual es la temperatura que trae el liquido en desde la primera etapa de evaporación.

Tabla 7. Resumen con lo valores calculados de las constantes del modelo del evaporador.

Constante	Nombre de la constante	Valor
$\dot{m}_{LS}$	Flujo de masa del liquido de entrada	$0.97\frac{kg}{s}$
U	Coeficiente de transferencia de calor en la calandria	$8.28\frac{Kcal}{°Csm}$
A	Área total de contacto de la calandria	$1.18m^2$
m_L	Masa total de la película que se forma dentro de la calandria	3.54Kg
c_L	Capacidad calorífica del liquido	$1\frac{Kcal}{kg}$
c_V	Capacidad calorífica del vapor	$0.8\frac{Kcal}{kg}$
T_{VE}	Temperatura de entrada del vapor	150°C
T_{LE}	Temperatura de entrada del liquido	72°C

Con base en resumen de valores de la Tabla 7 se calcularon las constantes que se muestran en la Figura 22. Diagrama de bloques del evaporador., el diagrama de bloques final muestra abreviaciones como UA, la cual es la multiplicación entre el coeficiente de transferencia de calor y el área total de contacto con el vapor, las constantes necesarias son las que se muestran en las ecuaciones del modelo, ecuación 12 y 13 respectivamente.

Ya obtenido el modelo en lazo abierto, se procede a realizar el diseño del controlador.

5.3.1.4 Diseño de la etapa de controlador del lazo de vapor.

Para el diseño del controlador de lazo de temperatura del vapor se utiliza el método de la curva de reacción de ziegler nichols, el cual es descrito en la sección 3.4.2, esto debido a que el sistema cuenta con un tiempo muerto, a continuación se explicaran los criterios por los cuales se eligió el tipo de controlador, así como el calculo de los parámetros de funcionamiento del mismo.

Utilizando el diagrama de lazo abierto de la Figura 22, y con ayuda del software SCILAB, se encontró la respuesta del sistema ante un escalón de 1 kg/s de flujo vapor cuando este se encuentra en lazo abierto, este se muestra en la Figura 23.

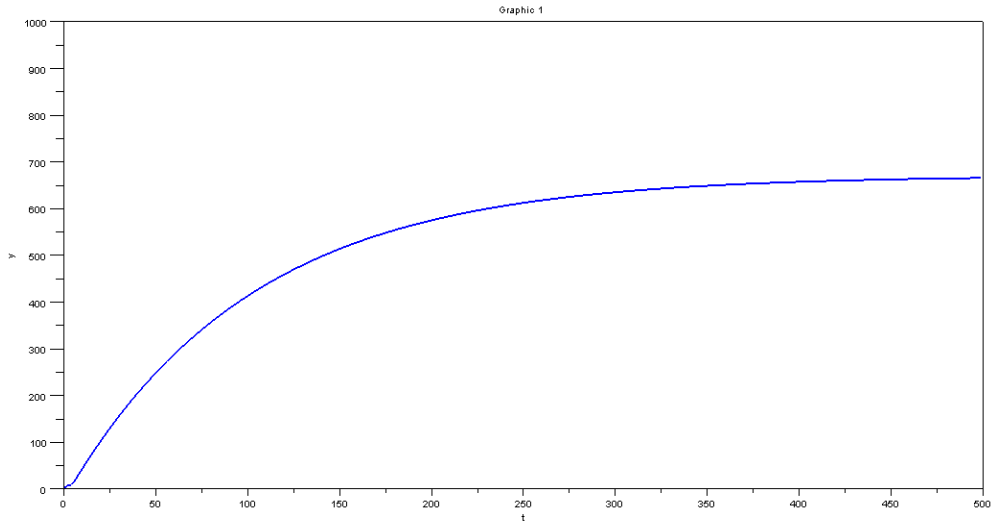

Figura 23. Respuesta del evaporador y la válvula en lazo abierto.

A la hora de escoger el controlador, se debe tomar en cuenta que a el sistema no es necesario corregir las características de tiempo de respuesta, debido a que el intercambio de energía por medio del vapor es lo suficientemente rápido, de 6 – 8 minutos, como para satisfacer este requisito por parte de la empresa contratante, en consecuencia, como se observa en la figura 23 si es necesario

corregir el error o el valor final en el sistema antes perturbaciones en el mismo, con ello se justifica la utilización de un controlador PI, el cual es muy utilizado en la industria para los controles de lazos de temperatura.

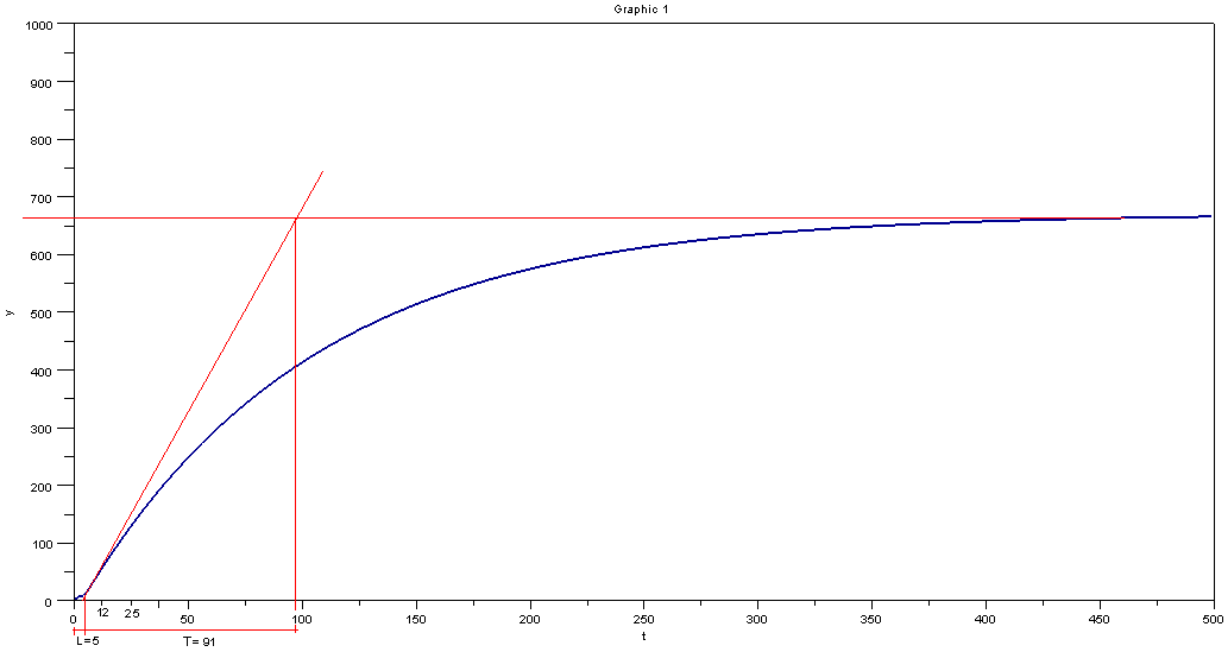

Figura 24. Método de la curva de reacción de ziegler nichols aplicado al sistema.

En la Figura 24 **se muestra como se realizaron las trazas para el cálculo de las constantes del consolador PI, en este caso el valor de T = 91 y el de L = 3, usando la**

Tabla 2 se realizan los siguientes cálculos:

$$Kp= 0.9\ T/L$$

$$Kp= 0.9 * 91/3 = 30,3333$$

Para el cálculo del T_i se tiene que:

$$T_i= L/0.3 = 3/0.3 = 10.0$$

Los datos obtenidos en los cálculos anteriores son para un sistema con ganancia unitaria, sin embargo si se observa el sistema posee un valor final de 660 °C como respuesta teórica de salida, por ello es necesario encontrar un

ganancia de corrección para el sistema con condensador. Para ello primero se obtiene el error en estado estacionario ante una entrada de escalón unitario.

$$Ess = \frac{1}{1 + K_S}$$

Se tiene que :

$$K_S = \lim_{S \to 0} G_P(s) = 660°C$$

$$Ess = \frac{1}{1 + 660°C} = 0.001513 = Kc$$

El valor calculado anteriormente dice cuanto es el factor para la ganancia de salida, por la cual la ganancia final de sistema seria igual a la unitaria.

La ecuación final con el cálculo del compensador es:

$$Gc = Kc \frac{30.333(s + \frac{1}{T_i})}{s}$$

$$Gc = 0.001513 * \frac{30.333(s + 0.1)}{s}$$

El compensador final queda expresado como:

$$Gc = 0.0456 \frac{(s + 0.1)}{s}$$

El diagrama de bloques de la Figura 25 se observa el control completo con cada uno de los involucrados, el condensador, la válvula, el evaporador, y el sensor, en el mismo diagrama se coloco una ganancia después de la consigna, esta misma corresponde al escalamiento para relacionar los valores en la operación de resta en la que se calcula el error, este se obtiene al encontrar el valor final del sensor, cuado el $\lim_{S \to 0} H(s) = 0$, el cual es de 0.079.

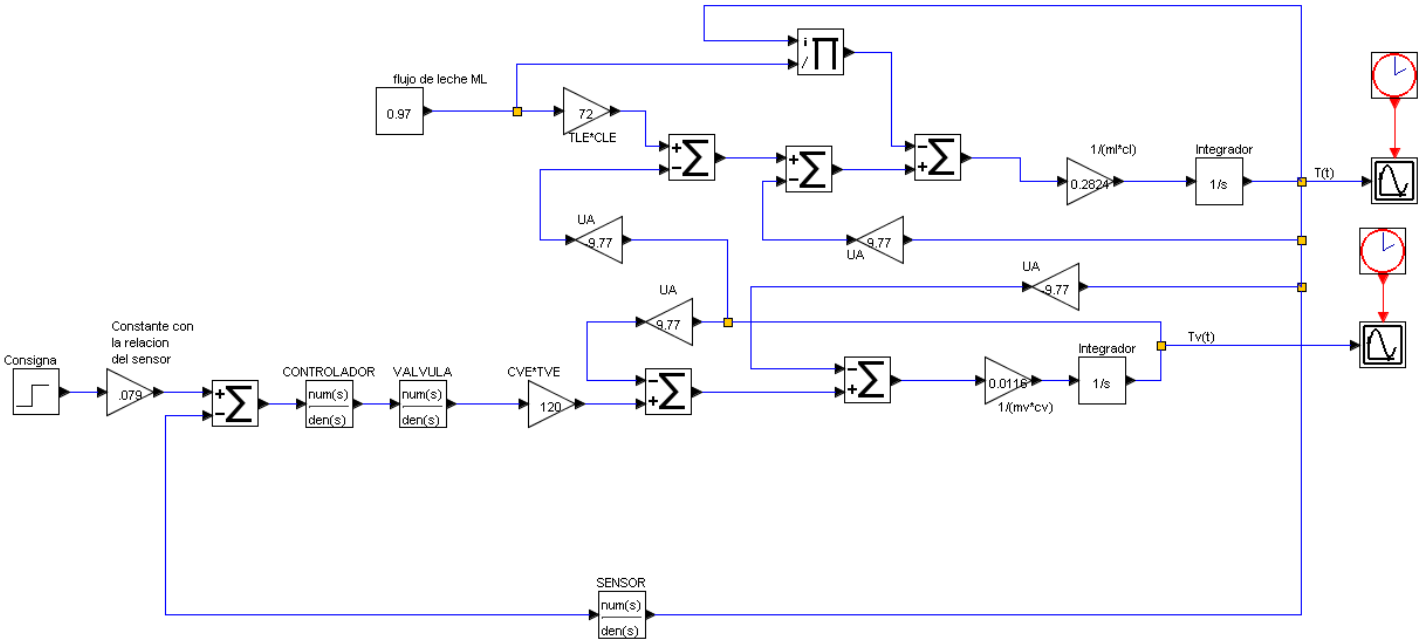

Figura 25. Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura con el compensador.

5.3.2 Lazo de control de flujo de agua de enfriamiento.

Este lazo, es muy sencillo en cuanto a su operación, por medio del control de flujo de agua por una tubería se controla la condensación del los vahos en la etapa de salida del evaporador, y con ello el vacío en la calandria. Por lo que el modelo se resume a una válvula, y un sensor de flujo en la tubería, y con base en el control se debe garantizar un flujo estable o constante de líquido, que garantice la condensación de los vahos en la etapa de salida del evaporador, en la teoría al extraer estos vahos y convertirlos en un liquido condensado, se reduce la masa de vapor y por consiguiente se crea un vacío en el las calandrias.

Para este caso contamos con una tubería presurizada, no muy diferente a la de un radiador o la de una tubería de agua casera, el flujo de agua es controlado con la apertura de la válvula proporcional. Se utiliza un serpentín de condensación dentro del sistema de vacío, dentro de las perturbaciones

externas tenemos que la presión en la tubería no es constante, es por ello que se necesita de un control de apertura en la válvula de agua de enfriamiento, el flujo requerido o la consigna de entrada es configurable por el usuario.

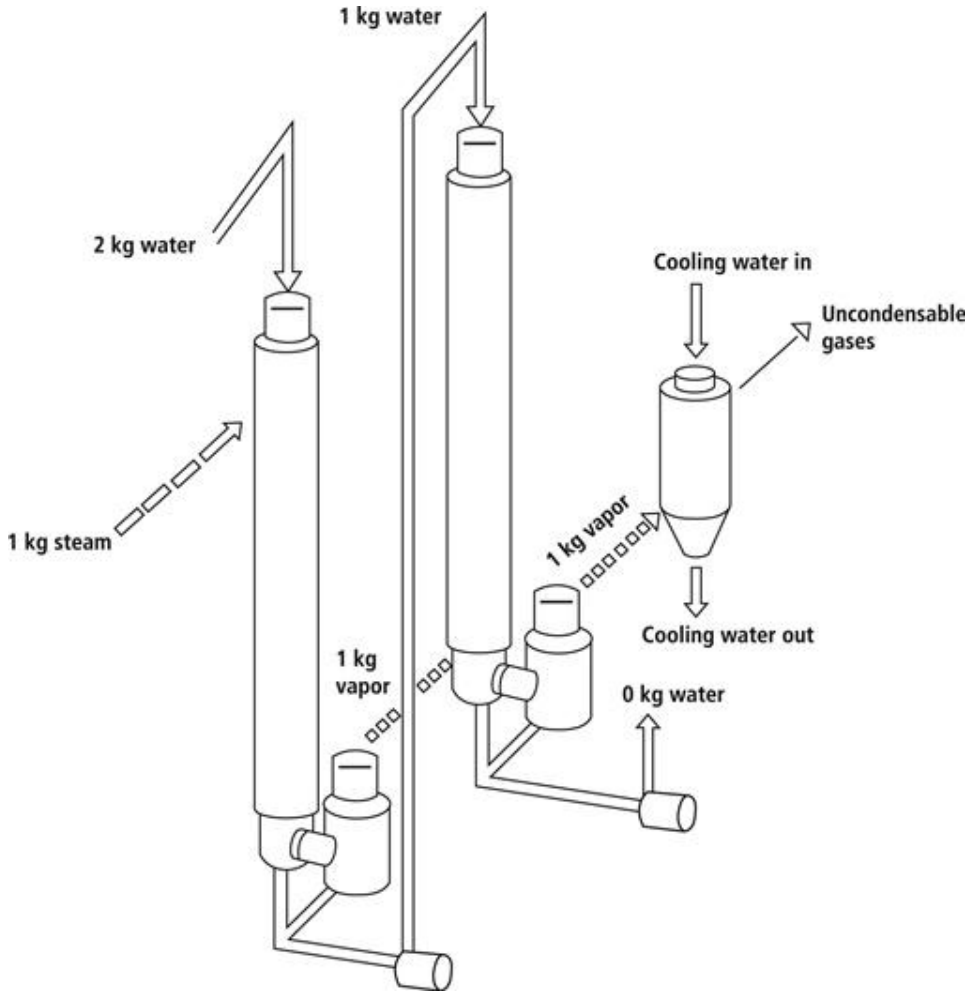

Figura 26. Evaporador de película descendente de doble efecto.

En la Figura 26 se observa un diagrama equivalente de un evaporador de dos efectos, en el cual se detallan cada una de sus partes, entre ellas se encuentran la de agua de enfriamiento donde se condensan los vapores o vahos provenientes del la calandria.

5.3.2.1 Modelado del sensor de flujo.

Para el sensor de medición de flujo se utiliza instrumentación rosemount, en este caso es de serie 8880C el cual es un caudalímetro Vortex, cuenta con protocolo HART, que garantiza una señal de 4 a 20 mA a la salida, para ello utilizan un transmisor 3051S.

Este sensor permite al usuario programar los valores del escalamiento, en este caso el valor mínimo y máximo, en el proceso estos valores fueron colocados, según los requerimientos de flujo de agua en la tubería de 1 pulgada, con los valores de 0.67 m3/h a 15.3 m3/h, que equivale a 0.111 l/s a 4.166 l/s, como se observa en la Figura 27

Tamaño de línea de proceso (DN/Pulgadas)	Medidor Vortex (2)	Índices de caudal de agua medible mínimo y máximo*	
		Galones/minuto	Metros cúbicos/hora
15/ 0.5	8800CF005	1.76 a 23.7	0,40 a 5,4
25/ 1	8800CF010	2.96 a 67.3	0,67 a 15,3
	8800CR010	1.76 a 23.7	0,40 a 5,4
40/ 1.5	8800CF015	4.83 a 158	1,10 a 35,9
	8800CR015	2.96 a 67.3	0,67 a 15,3
50/ 2	8800CF020	7.96 a 261	1,81 a 59,4
	8800CR020	4.83 a 158.0	1,10 a 35,9
80/ 3	8800CF030	17.5 a 576	4,00 a 130
	8800CR030	7.96 a 261.0	1,81 a 59,3
100/ 4	8800CF040	30.2 a 992	6,86 a 225
	8800CR040	17.5 a 576	4,00 a 130
150/ 6	8800CF060	68.5 a 2251	15,6 a 511
	8800CR060	30.2 a 992	6,86 a 225
200/ 8	8800CF080	119 a 3898	27,0 a 885

Figura 27. Tabla con los datos para escalamientos del sensor según el diámetro de tubería.

Con los datos anteriormente especificados se realiza el cálculo de ganancia del sensor:

$$K_T = \frac{Rango\ salida}{Rango\ entrada} = \frac{20\,mA - 4\,mA}{4.166\frac{l}{s} - 0.111\frac{l}{s}} = 3.94\frac{mA}{l/s}$$

Con base en los datos del protocolo HART, mostrados en la Figura 28, se obtienen los tiempos de respuesta para el transmisor 3051S, el cual es de 100 milisegundos

Funcionamiento dinámico

		4–20 mA (HART®)(1)	Protocolo Fieldbus(2)	Tiempo de respuesta típico del transmisor
Tiempo de respuesta total (Td + Tc)(3):				
3051S_C, Rangos 2A–3A:		100 milisegundos	152 milisegundos	
Rango 1A:		255 milisegundos	307 milisegundos	
Tiempo muerto (Td)(4)		45 milisegundos (nominal)	97 milisegundos	
Velocidad de actualización	3051S	22 veces por segundo	22 veces por segundo	

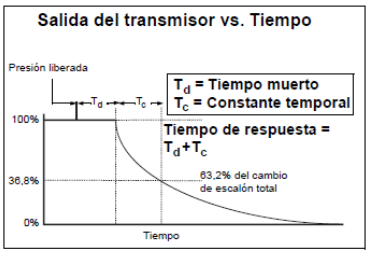

Figura 28. Protocolo HART, tiempos de respuesta del transmisor.

Si se tiene que la respuesta de un sensor esta dada por la ecuación:

$$H(s) = \frac{K_T}{\tau_T \cdot s + 1}$$

Donde K_T es:

$$K_T = 3.94 \frac{mA}{l/s}$$

Se tiene que la función de transferencia del sensor es

$$H(s) = \frac{3.94}{0.1 \cdot s + 1}$$

Sacando a factor común el valor de 0.1 se tiene que la función de transferencia del sensor esta dada por:

$$H(s) = \frac{39.4}{s + 10}$$

5.3.2.2 Válvula de control de flujo de agua de enfriamiento.

Para el control de agua de enfriamiento se utilizo una válvula de fisher EZ easy-e con un actuador baumann 32, el cual es un actuador electro-neumático en el que una de sus opciones de control es una señal de 4 a 20 mA, este mismo tipo de actuador es el que se utiliza en la válvula de control de flujo de vapor.

Los datos obtenidos del fabricante se resumen en la siguiente tabla

Tabla 8. Resumen con lo valores para la válvula de agua de enfriamiento.

Valvula	Kv[m3/h]	Transmisor[s]
Ficher actuador Baumann	14.62	1,130

Con ello se tiene que el modelo de la válvula utilizando la ecuación de respuesta de primer orden, esta dada por:

$$G_V(s) = \frac{K_V}{\tau_V \cdot s + 1}$$

Con ello tenemos que

$$G_V(s) = \frac{14.62}{1.130 \cdot s + 1}$$

Reducción de la expresión:

$$G_V(s) = \frac{12.0398}{s + 0.885}$$

5.3.2.3 Diseño de la etapa de control.

Para el diseño del sistema de control se tiene que como premisa principal corregir el error en estado estacionario, el sistema en lazo abierto corresponde a uno de una ecuación diferencial de primer orden, con un solo polo.

Como se requiere corregir en estado estacionario, es necesario agregar un integrador, por lo que un compensador de atraso es la solución que se ajusta de manera mas adecuada.

Si se analiza el lugar de las raíces del sistema a lazo abierto por medio de la ecuación:

$$1 + K * G_V(s) = 0$$

Con la ecuación anterior se obtiene el lugar de las raíces que se observa en la Figura 29, se tiene un polo en -0.885, el compensador que se ha de diseñar es de atraso y debe ser capaz de corregir el error en estado estacionario, al utilizar el método de asignación de cero arbitrario para el condensador de arranque se necesita que este se encuentre a la derecha del polo mas lento del sistema, en este caso el polo mas lento es 0.883 por lo que se elige el valor de 0.5 para el cero del compensador, este corresponde a la constante integral K_i del sistema, la cual se encarga de corregir el error en estado estacionario del sistema.

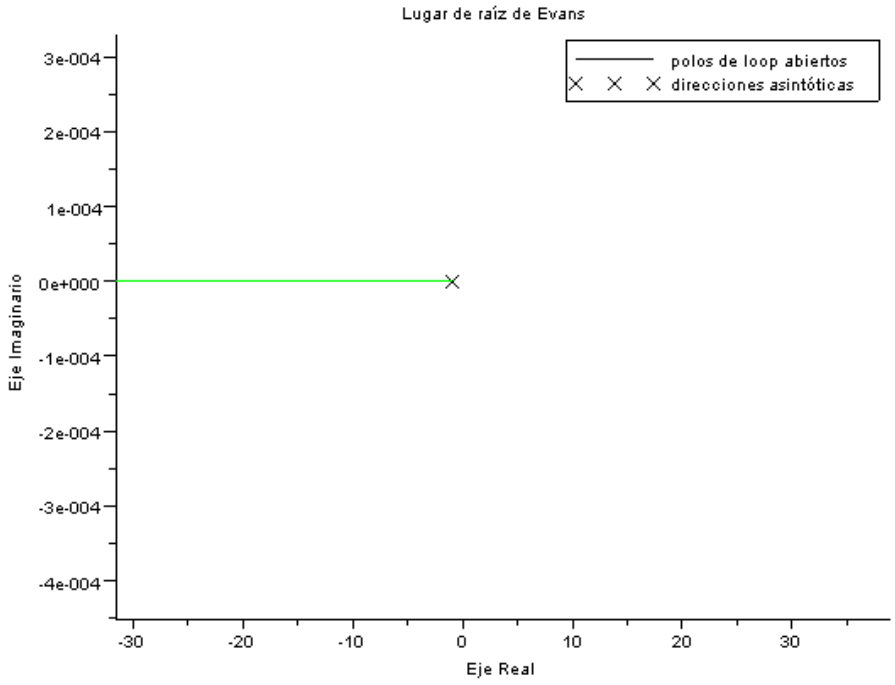

Figura 29. Lugar de las raíces para la función de transferencia de la válvula.

Para averiguar la ganancia de la válvula cuando el tiempo de estabilización tiende a infinito:

$$G_V(s \to 0) = \lim_{S \to 0} \frac{12.0398}{s + 0.885} = 14.01$$

La ganancia proporcional del sistemas debe ser capaz de compensar esta ganancia para prevenir que el sistema tenga un sobre impulso muy grande, entre mas cercano sea la ganancia resultante a la unidad, menos sobreimpluso tendrá el sistema, ya que el sistema no posee raíces que lo hagan inestable y por lo tanto lo hagan oscilar.

El sistema posee en lazo abierto una ganancia de 14.01 cuando el tiempo tiende a infinito o ‘s’ tiene a cero, por lo que es recomendable que la ganancia de seguimiento sea:

$$G_V(s \to 0) * K_F = 1$$

$$14.01 * K_F = 1$$

$$K_F = \frac{1}{14.01} = 0.071$$

Para que el sistema posea un sobre impulso lo mas pequeño posible, el valor de la constante del compensador debe ser lo mas cercano a 0.071 así que se elige el valor de 0.08 para el compensador.

La ecuación del compensador es la siguiente:

$$Gc = 0.08 \frac{(s + 0.5)}{s}$$

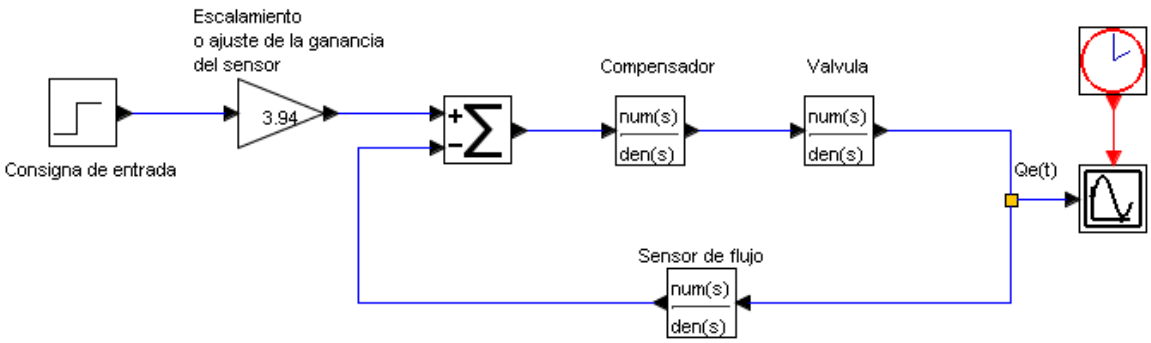

Figura 30. Diagrama de bloques del lazo de agua de enfriamiento.

En la Figura 30 se muestra el diagrama de bloques del sistema completo, la variable de salida es el flujo, este es medido por medio del sensor vortex, el valor final de la etapa del sensor es 3.94 mA, es por ello que se agrega un escalamiento en la entrada con esta mismo valor, para garantizar que la resta se del error tenga las mismas unidades en este caso la entrada del controlador debe ser en miliamperios.

5.4 Diseño de los bloques de programación

En la parte del programa se tiene que incluir los dos bloques de control del sistema, el correspondiente al control de temperatura y el de agua de enfriamiento.

El software de desarrollo que se utiliza es el RSLogix 5000 versión 17.1, y dentro del lo contemplado en el proyecto se tiene que realizar las rutinas de control de los lazos involucrados.

Con base en los diagramas de bloques de las secciones anteriores, se ha de estructurar los bloques del programa, para ello primero se debe evaluar cuantas entradas y salidas se requieren en el programa.

Tabla 9. Señales involucradas en el control.

Señal	Descripción	destino
Temp_Efecto	Temperatura Del primer efecto	PLC
VALV_EFECTO2	Apertura proporcional de la válvula de control de flujo de vapor	Evaporador
F_AGUA	Flujo de agua de enfriamiento	PLC
VALVULA_VACIO	Apertura proporcional de la válvula de control de agua de enfriamiento	Evaporador

En la Tabla 9 se observa el resumen de señales de entrada y salida necesarias para realizar la programación de los bloques, luego de esto se debe tener en cuanta que la consigna o set point, tanto para la temperatura del efecto 2 como para el flujo de agua de enfriamiento, debe ser programable o elegible por parte del usuario del sistema, por lo que la señal es accesible dentro del bloque de programa.

El primer paso es definir las rutinas que se han de crear, se creo un programa temporizado llamado PID el mismo es configurado para ejecutarse cada 10 mS, como se observa en la Figura 31, que muestra la parte de configuración del controlador en el RSlogix 5000, se crean las rutinas: PRINCIPAL, CNTR_EFECTO2, CNTR_VACIO, escalamientos, estas son las que se ven encerradas en un rectángulo rojo en la misma figura.

El paso siguiente es definir el contenido de cada una de las rutinas, en las cuales la rutina de control de vacío y de control de temperatura se han asemejar en cuanto a su estructura de programación

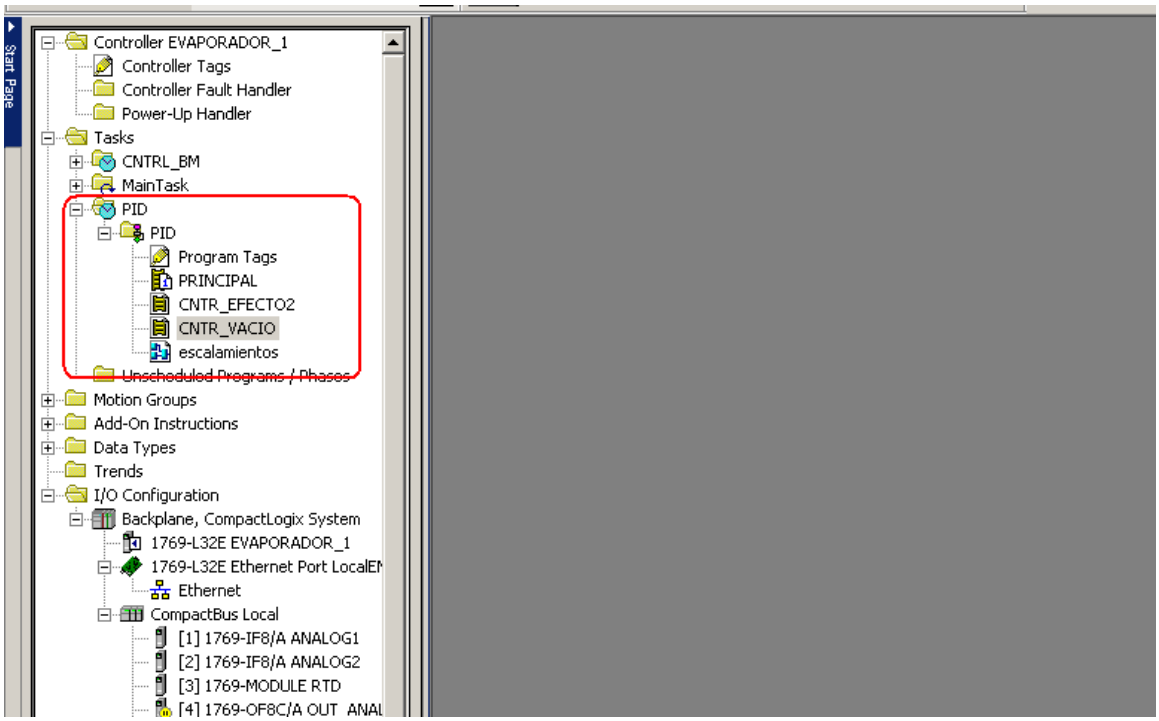

Figura 31. Definición de las rutinas de control de programa.

5.4.1 Rutina PRINCIPAL.

En la estructura de programación del software de Rockwell siempre debe existir una rutina principal, la cual es la que se ejecuta siempre y se encarga de llamar a ejecución a las otras rutinas por medio de una instrucción JSR, como se observa en la Figura 32.

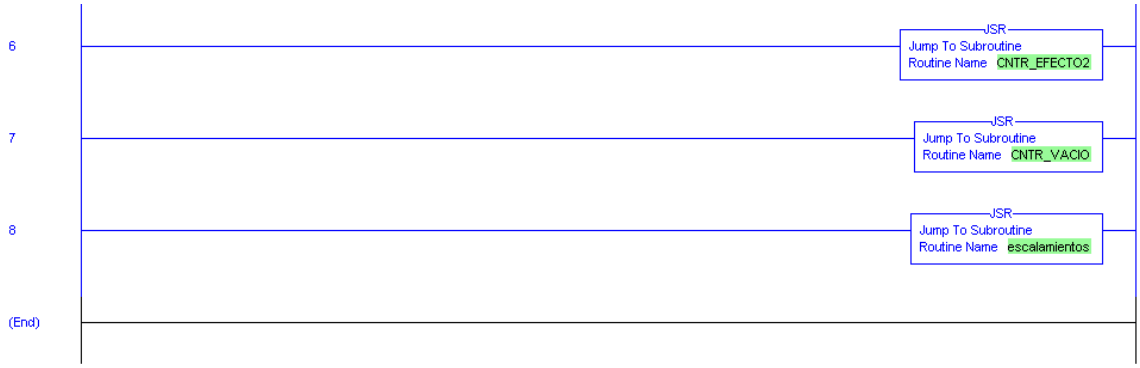

Figura 32. Llamado de las rutinas en el programa principal.

5.4.2 Rutina CNTR_EFECTO2 y CNTR_VACIO.

En la rutina de control de temperatura se tiene el bloque llamado PID en el que se tiene que configurar las condiciones para la operación del controlador, es decir, los valores de las constantes Kp y Ki.

En la Figura 33 se observa la rutina de control de efecto 2, en las primeras dos filas del Ladder se presentas los limites para la consigna o set point, el mismo no debe ser menor a 0 °C ni mayor a 150, la condición de 0 grados centígrados apagaría el lazo debido a que en la realidad el punto de equilibrio seria la temperatura ambiente. La tercera línea es la correspondiente a la instrucción PID.

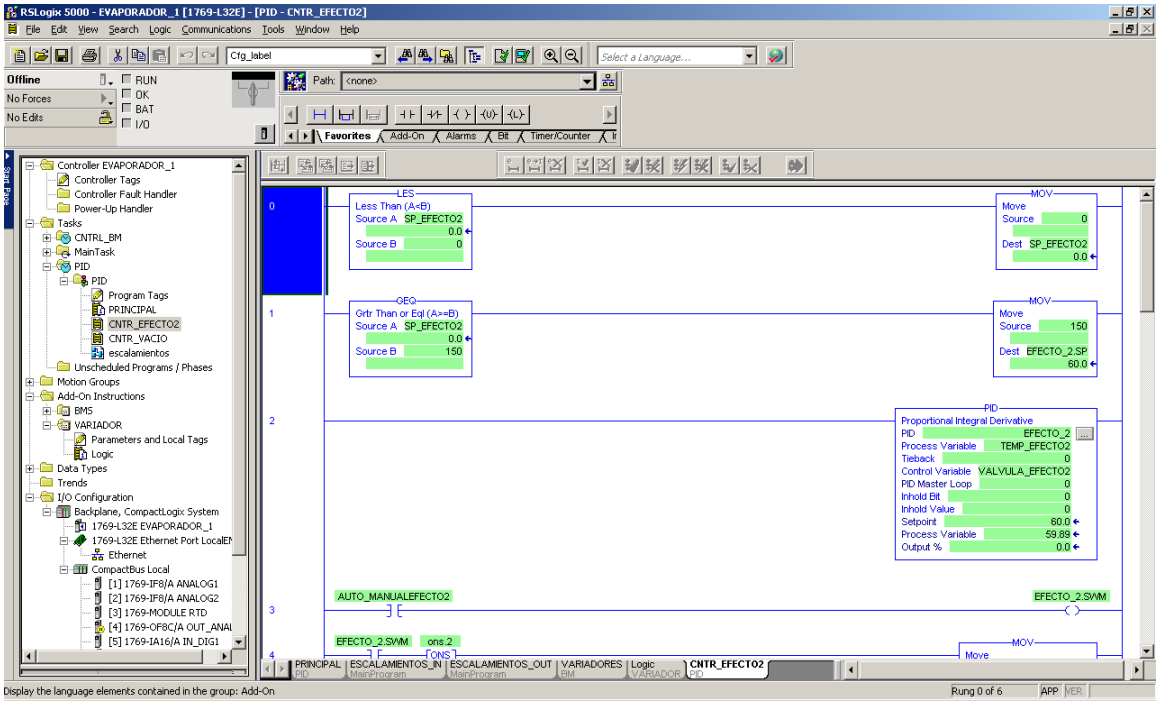

Figura 33. Rutina de CNTR_EFECTO2.

En la instrucción PID se configuran todos los datos necesarios para que el sistema logre el equilibrio, asi se debe colocar los valores de las constante Ki y Kp en este caso los obtenidos en las sección 5.3 correspondientes a los calculados para los lazos, con base en las ecuaciones de los controladores se tiene que:

Para el la ecuación del controlador de temperatura en el efecto 2:

$$Gc = 0.0456\frac{(s+0.1)}{s}$$

$$Gc = 0.0456 + \frac{0.00456}{s}$$

$$\therefore K_P = 0.0456 \text{ y } K_i = 0.00456$$

Para el la ecuación del controlador de flujo de agua de enfriamiento:

$$Gc = 0.08\frac{(s+0.5)}{s}$$

$$Gc = 0.08 + \frac{0.04}{s}$$

$$\therefore K_P = 0.08 \text{ y } K_i = 0.04$$

Con los datos obtenidos anteriormente se configura los parámetros del bloque de PID dentro del programa, como se observan encerrados en rojo en la Figura 34.

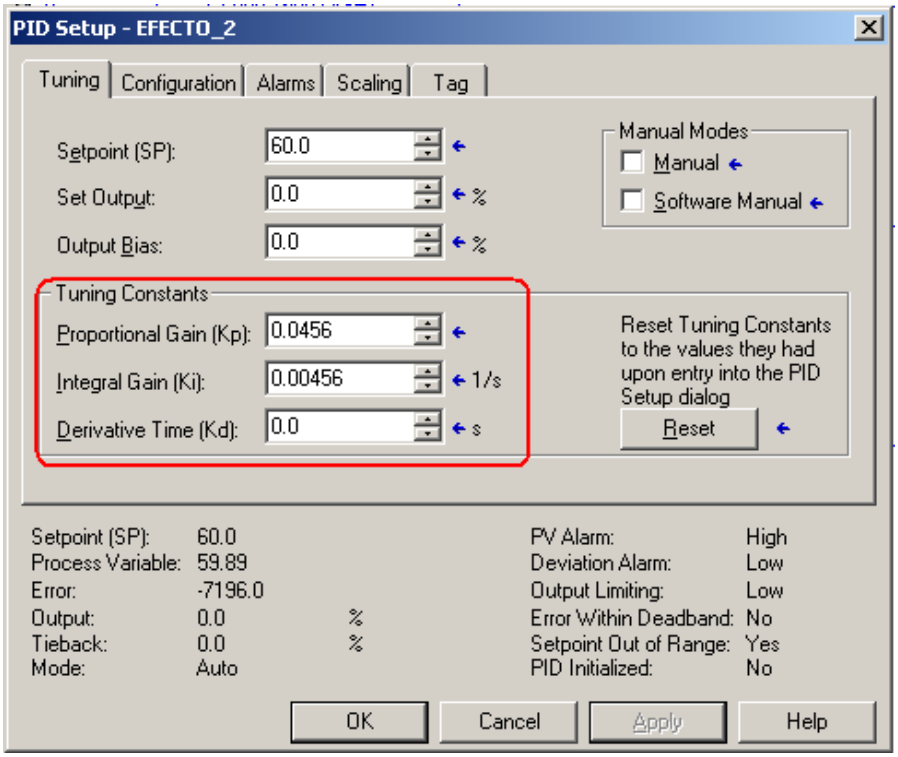

Figura 34. Configuración de las constantes de la función PID.

Lo mismo se realiza para colocar los valores de las constantes de la función PID del control de vacío por agua de enfriamiento, esto se observa en la Figura 35.

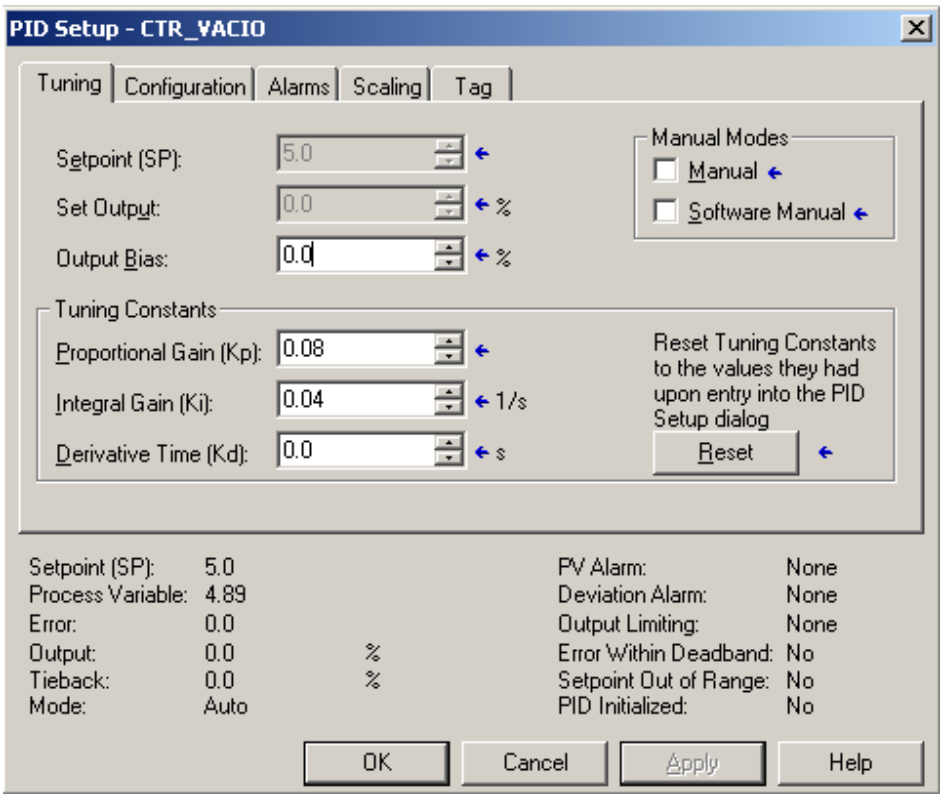

Figura 35. Configuración de las constantes de la función PID.

Como ultimo detalle hay que definir la entrada a la función PID en cada una de los bloques. Para el control de temperatura es TEMP_EFECTO2, el cual es la lectura del sensor de temperatura direccionada desde el módulo de entrada analógico, en el caso flujo de agua de enfriamiento F_AGUA, en cada uno de los bloques se tiene que la variable de control es la apertura de la válvula, lo cual corresponde exactamente con el diseño que se muestran en la sección 5.3 donde, así para el bloque de temperatura se controla la válvula de flujo de vapor, y para vacío la válvula de flujo de agua de enfriamiento.

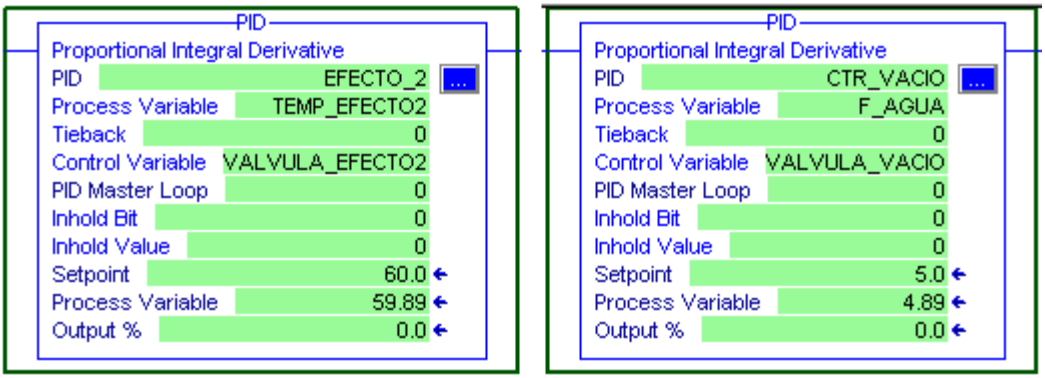

Figura 36. Detalle de la función PID para el efecto 2 y el control de vacío.

Por medio de un panel de operador se tiene acceso a la variables de ajuste de lo SETPOINT, con ello el usuario del sistema puede ajuntar estos dentro de los parámetros requeridos por el evaporador, para ello se tiene un rango de 0 a 150 en el lazo de temperatura de vapor, y de 0 a 5 l/s para el lazo de para el caso del flujo de agua de enfriamiento.

5.4.3 Rutina escalamientos.

Los escalamientos, se crearon por el hecho que hay que hacer una relación entre los SETPOINT o valor deseado, y la lectura entregada por el sensor, esto con el objetivo que al realizar la operación de cálculo del error en función PID halla coincidencia con las unidades.

Los escalamientos, que se observan el la Figura 37, son programados en una rutina de bloques, esto debido a que esta disponible solo de esta forma en el software de desarrollo. En los escalamientos se programa una ecuación lineal, en la que para el caso de la temperatura la pendiente es 0.079 este valor es el calculado en la sección 5.3.1.4, y para el escalamiento del vació corresponde a 3.94, cabe recordar que ambos valores han sido calculados con el valor final de la función de transferencia del sensor correspondiente.

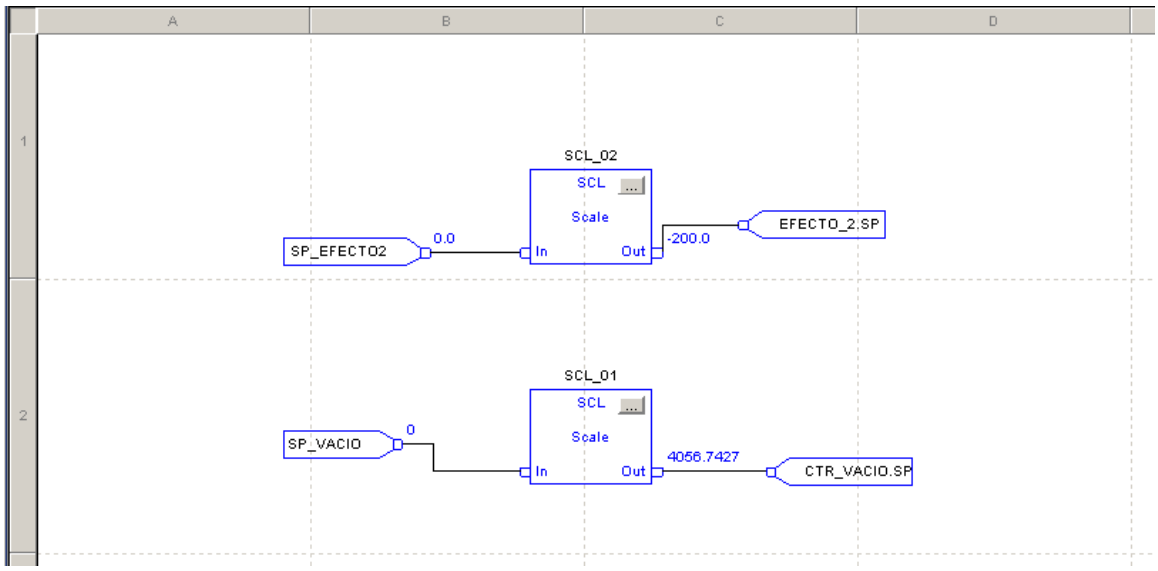

Figura 37. Escalamientos para los SETPOINT de cada uno de los lazos.

Capítulo 6: Análisis de Resultados

6.1 Resultados

6.1.1 Lazo de control de temperatura

En el lazo de control de temperatura se tiene que el vapor de entrada esta a una temperatura de 150° C, y la temperatura del liquido que entra el segundo efecto es de 70 a 72 ° C y conforme llega a la parte superior de la calandria y en su caída por los tubos su temperatura no debe descender los 60 grados, idealmente entre 52 y 58.

Como primer escenario se obtiene la respuesta de control temperatura en el evaporador para un setpoint de 58 grados centígrados sin perturbaciones. Al aplicar el dicho escalón se obtiene la respuesta que se muestra en la Figura 38.

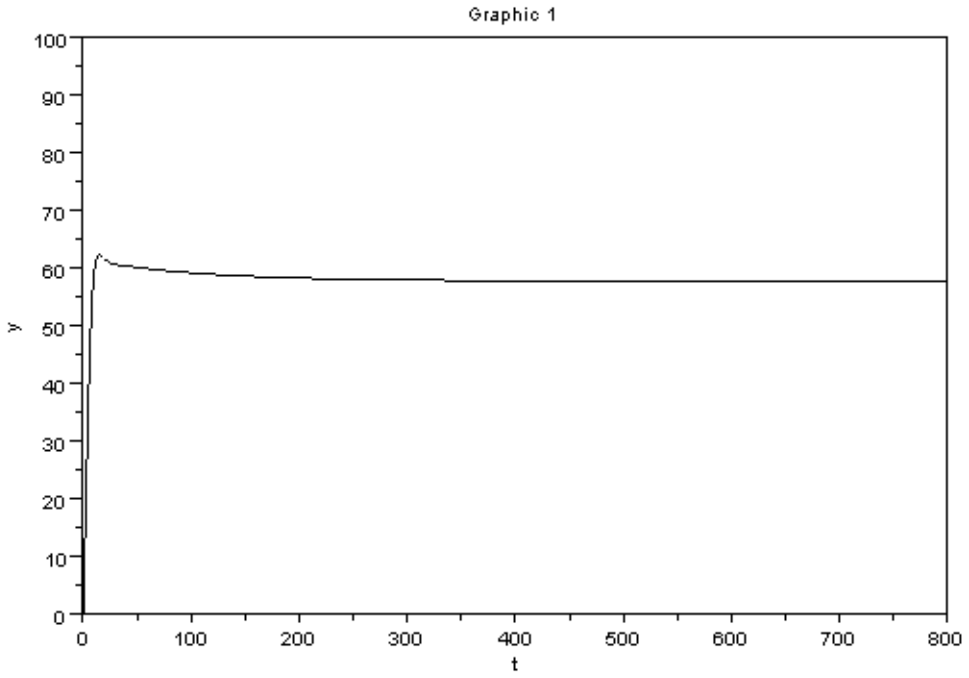

Figura 38. Respuesta para el lazo de temperatura para un escalón de 58°C.

La respuesta anterior se da a un flujo de leche de 0.97 kg/s, para un segundo escenario se aumenta este valor un 30 % con ello se obtiene la respuesta de la Figura 39, esto para mostrar el comportamiento ante perturbaciones.

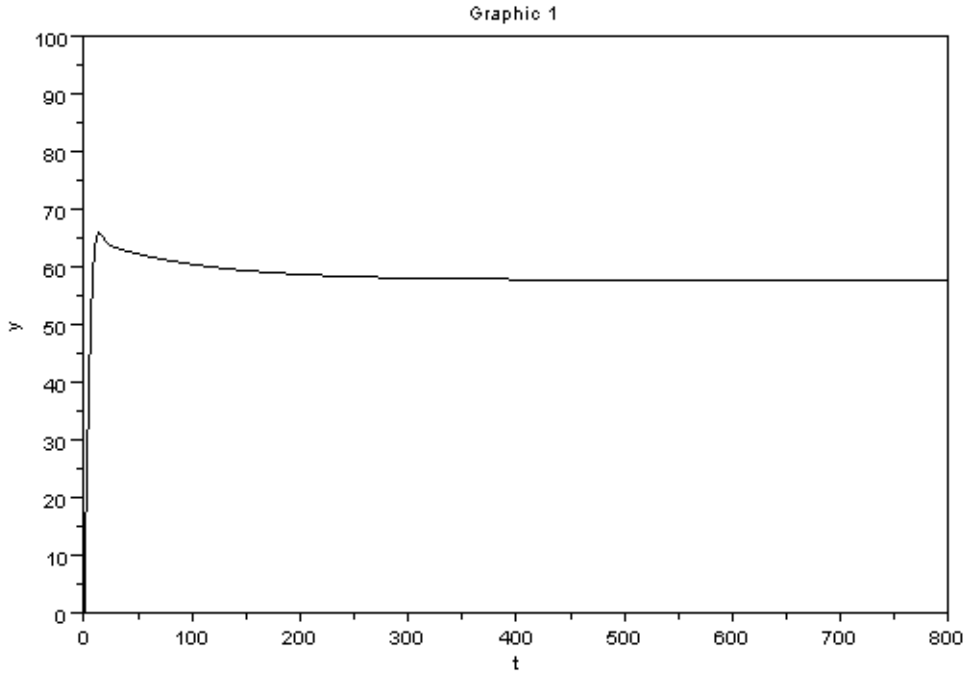

Figura 39. Respuesta para el lazo de temperatura para un escalón de 58°C para un flujo de leche de 1.25 kg/s.

Para la respuesta mostrada en la Figura 41, se muestra el comportamiento del lazo cuando la entrada de flujo de leche alcanza los 3 Kg/s de vapor, y así mostrar la respuesta ante una perturbación de este tipo

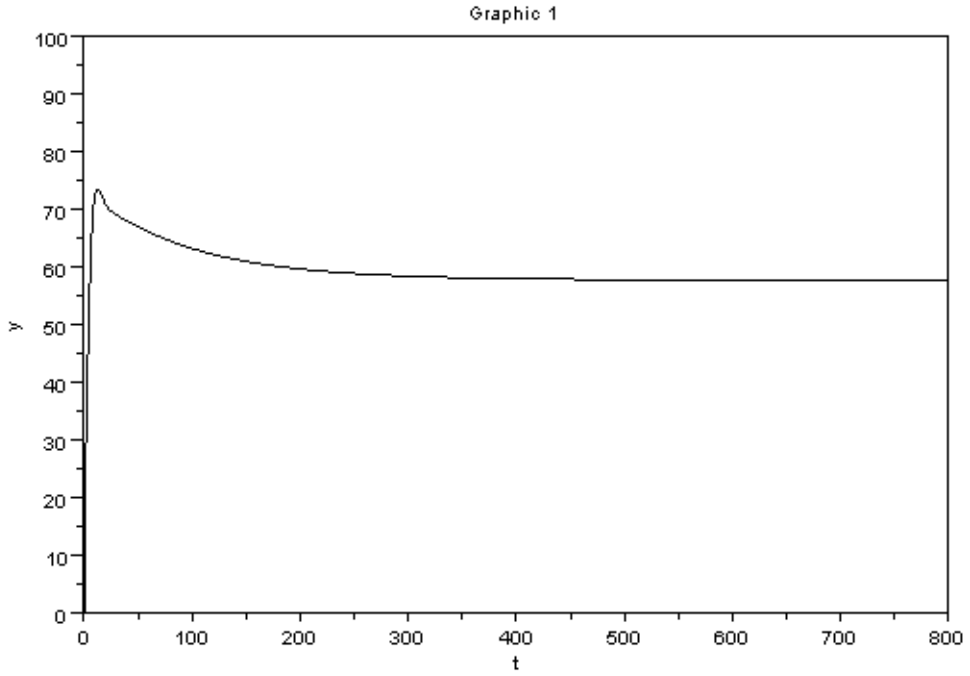

Figura 40. Respuesta para el lazo de temperatura para un escalón de 58°C para un flujo de leche de 3 kg / s.

En la siguiente respuesta se mostrara el como se comporta el sistema ante cambios en el valor deseado o setpoint, para este caso en la Figura 41 se muestra una gráfica con la respuesta ante un escalón de 65 °C, la misma respuesta se obtiene a un flujo de leche de 0.97 kg/s, para cada uno de los casos anteriores el tiempo que en se encuentra el equilibrio es aproximadamente 300 segundos.

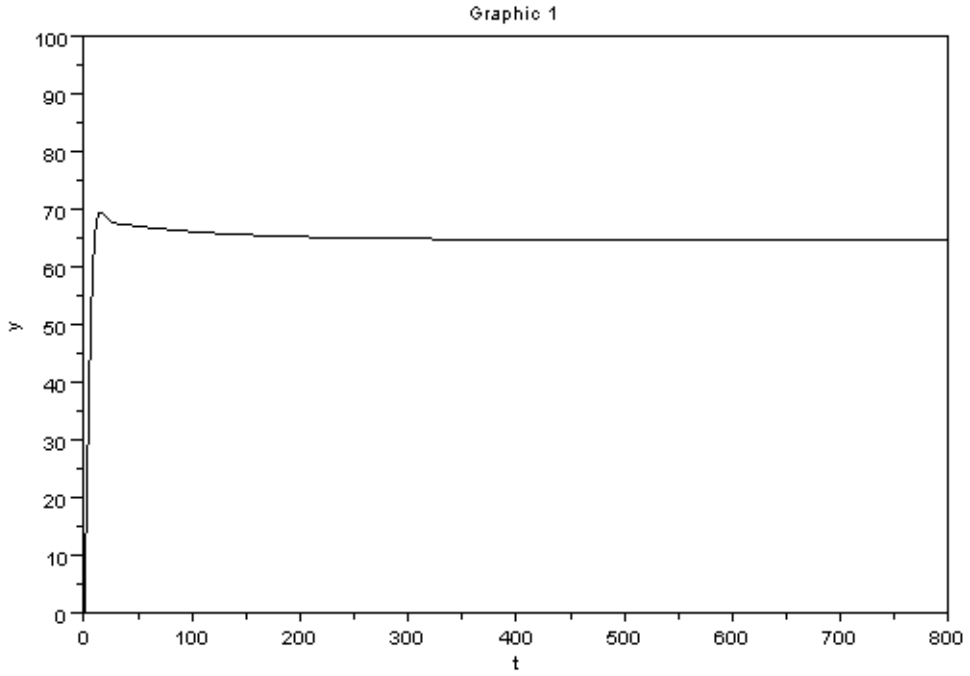

Figura 41. Respuesta para el lazo de temperatura para un escalón de 65°C.

En la Figura 42 se muestra un trend o gráfica con la respuesta de temperatura real del sistema, la cual esta ajustada a 60 grados centígrados, la misma fue proporcionada por la empresa contratante, en el mismo se muestran los valores de Setpoint y el de la variable de control que corresponde a la temperatura. En la **Error! Reference source not found.** se muestra la repuesta ante un escalón de 60 ° C, se debe notar que este mismo no empieza en 0 ° C si no en una temperatura cercana a la ambiente.

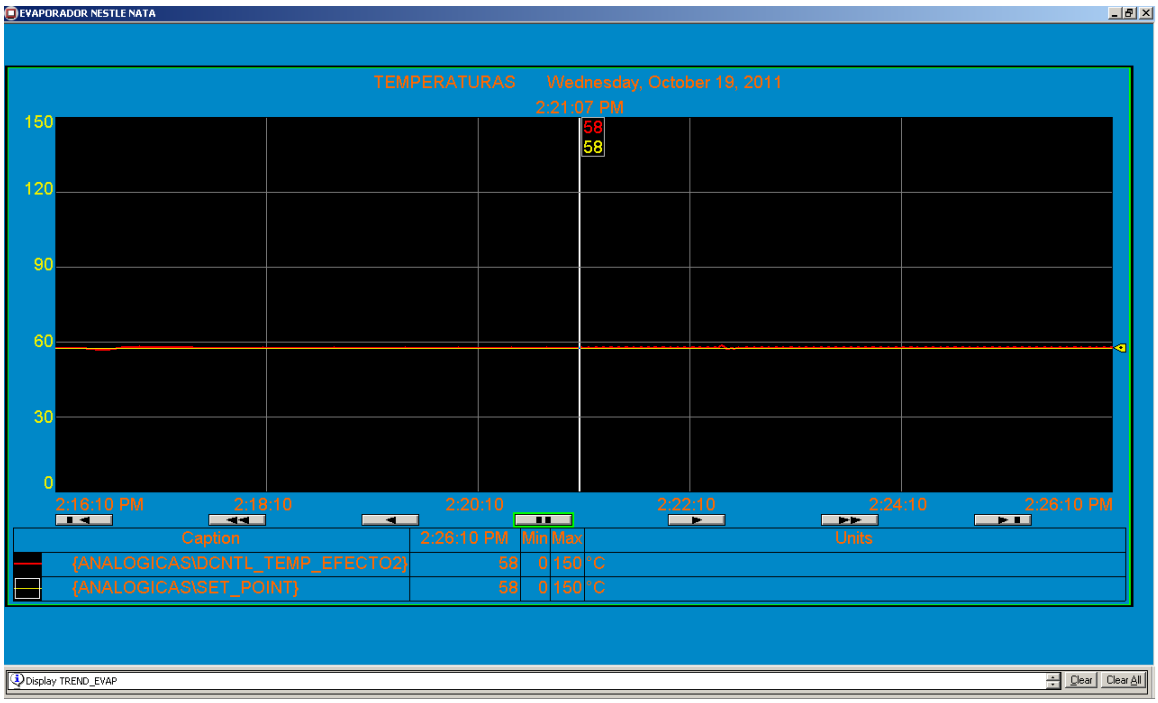

Figura 42. Gráfico donde se muestra la respuesta del lazo de control de temperatura.

6.1.2 Lazo de control de vacío por agua de enfriamiento

Para el lazo de agua de enfriamiento se tiene la gráfica de respuesta para un escalón de 3 l/s correspondiente al valor deseado de flujo de agua de enfriamiento, se esta alcanzando el equilibrio en 4 segundos como se muestra en la Figura 43, esta gráfica de respuesta corresponde al sistema con el compensador.

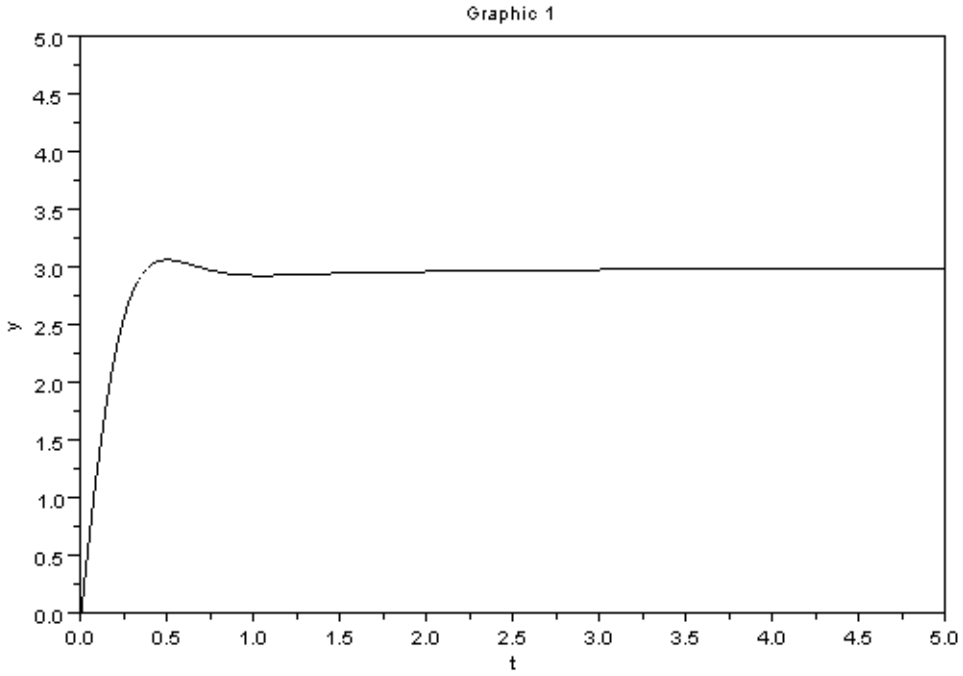

Figura 43. Respuesta de lazo de agua de enfriamiento ante un escalón de 3l/s.

En la Figura 44 se muestra el diagrama de bloques del sistema sin compensador, con este se traza la respuesta que se muestra en la Figura 45, el cual posee un sobre impulso mayor al 100 %.

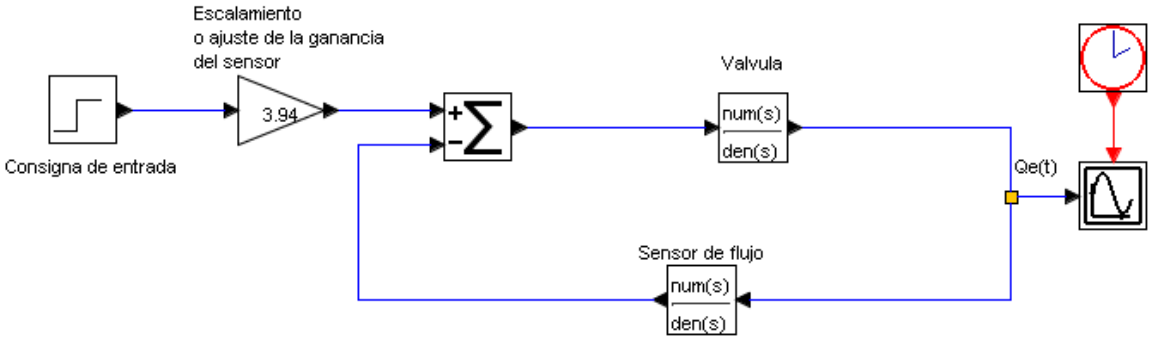

Figura 44. Diagrama de bloques para el sistema en realimentado si el controlador.

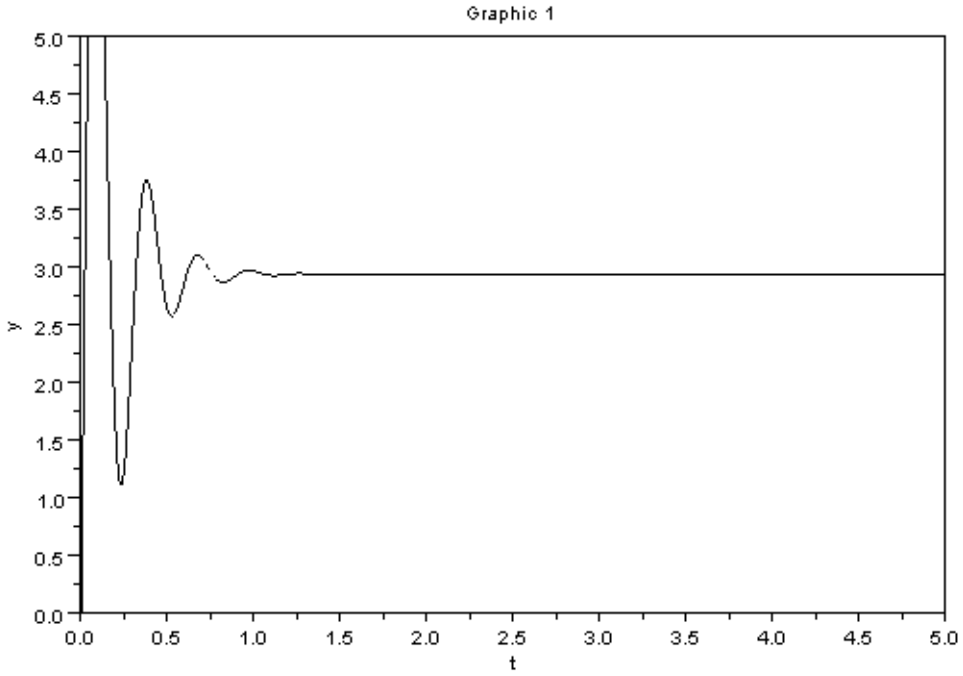

Figura 45. Respuesta del lazo de agua de enfriamiento sin compensador.

6.1.3 Pantalla para el ajuste del setpoint o valor deseado

En la pantalla que se muestra en la Figura 46, se muestra la pantalla que se encuentra en la computadora de operador, donde se pueden ingresar los valores del setpoint para cada uno de los lazos, el screenshot del mismo fue tomada cuando el sistema se encontraba inactivo.

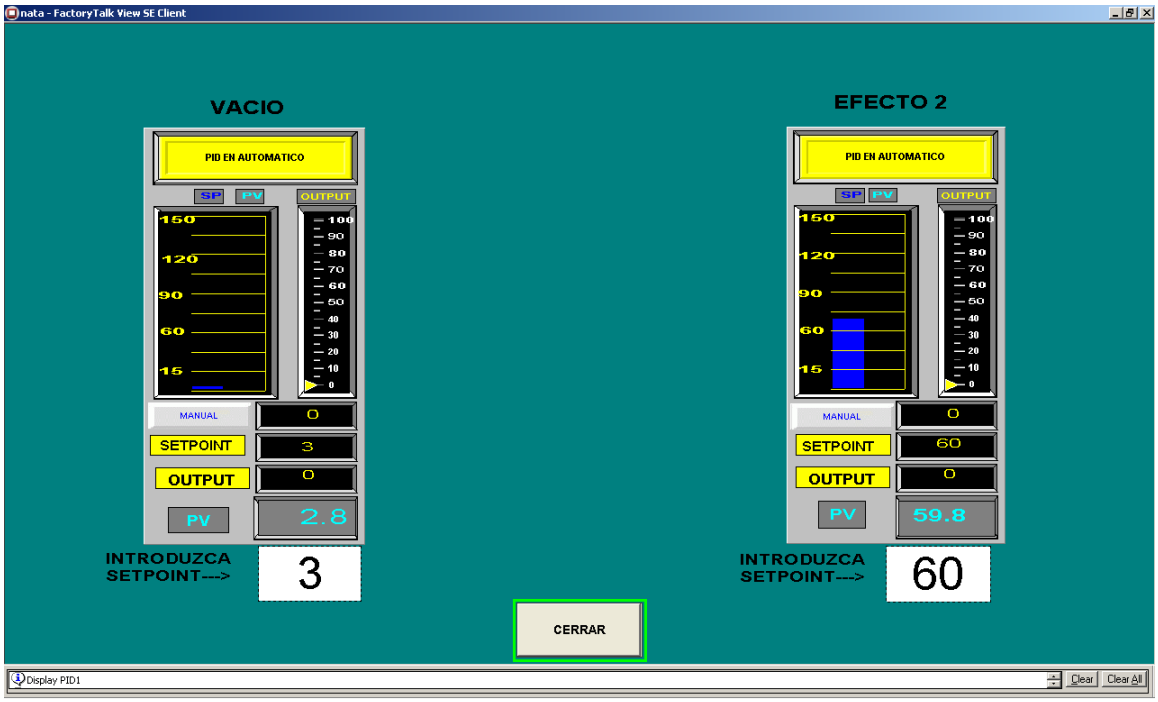

Figura 46. Ajuste de los valores deseados para el lazo de temperatura y vacío.

Como se observa en la pantalla anterior se puede ajustar el valor deseado o setpoint, también se puede ver el valor de la variable de proceso o PV, que corresponde al valor proporcionado por el sensor.

6.1.4 Oferta del proyecto versus compra de un equipo de evaporación nuevo.

Como parte de la meta del proyecto se tiene que exponer resultados que acrediten que la implementación del proyecto es más rentable que invertir en un equipo de evaporación nuevo.

Por motivo de confidencialidad financiera, no se pueden exponer los precios a los que oferta SIQ sus proyectos, pero si se puede hacer una comparación porcentual con respecto a la inversión en un nuevo equipo de evaporación, el cual esta valorado en $ 1 millón, contemplando el equipo físico necesario para el funcionamiento del mismo.

El desglose de proyecto se expone en la siguiente tabla:

Tabla 10. Costo del proyecto en porcentaje.

Rubro	Costo respecto a un sistema evaporador nuevo
Ingeniería	0.03%
Materiales	0.05%
Otros	0.007%

6.2 Análisis

Para el análisis de comportamiento de los lazos, de temperatura así como de vacío por agua de enfriamiento, se debe tener presente que el objetivo es cumplir con la condición de equilibrio deseado como primera premisa, sin embargo no se debe dejar de lado el tiempo en el se alcanza el equilibrio (valor deseado), pues este en el peor de los casos debe ser igual o menor, siempre y cuando no se sacrifique la estabilidad del sistema.

En el primer escenario que se muestra en la Figura 38 de la parte de resultados se tiene una respuesta por medio de la simulación del modelo con el software Scilab, en el mismo se muestra que se alcanza el equilibrio en t= 300 segundos con un sobre impulso de 3%, cabe destacar que para el modelo teórico tanto como en el real, la temperatura de entrada del liquido a evaporar, en este caso la leche, posee una temperatura de 72 grados, así que parte del sobreimpulso que se da al inicio de la respuesta esta directamente relacionado con la temperatura del liquido que ingresa a la calandria, para demostrar esto, se verifica el comportamiento en los otros tres gráficos, en el gráfico de la Figura 39 se muestra una respuesta cambiando el valor del flujo de entrada de leche de 0.97 kg/s a 1.25 kg/s se obtiene un tiempo de estabilización de 340 seg y el sobre impulso ahora es de 10 %, como se puede notar esto resultado arroja que al aumentar el flujo de liquido en la calandria también aumenta la capacidad de intercambiar calor, y con ello la inercia de la temperatura a ser cambiada , así que al ingresar una mayor cantidad de liquido en la calandria la temperatura de inicio del mismo se resiste mas al cambio de la nueva temperatura, la cual es en este caso 60 °C. La tendencia a incrementar la temperatura con el aumento del flujo se ve evidenciado cuando se observa la Figura 40, en el mismo se muestra que el pico máximo de temperatura es mayor que en la Figura 38 y Figura 39, en este caso el flujo se aumento a 3 kg / s leche, obteniendo como respuesta un sobreimpulso de 21.667 %, cabe destacar que en la realidad por limitaciones propias del evaporador y según la información de la descripción operativa, no es

factible tener un flujo de leche mayor a 1 kg/s, pues el máximo según las especificaciones dadas por la empresa contratante es de 3500 l/h que equivale a 0.97 kg / s.

Con el análisis de las Figura 38, Figura 39 y Figura 40, se demuestra que el sistema logra alcanzar el valor de la consigna o valor final deseado, eso analizando una de las posible perturbaciones a las que se ve sometido el sistema de evaporación, ya que las variaciones en temperatura están ligadas directamente a la capacidad calorífica del vapor, y al calor (energía) con el que viene el liquido a evaporar de la etapa anterior, el cual es dependiente del flujo de leche en la entrada de la calandria del evaporador, por motivos de robustez es necesario que el sistema se comporte de manera estable y que además sea resistente ante perturbaciones externas, tal es el caso de hacer la prueba de variación de flujo de liquido (leche) en la que se prueba que el sistema logra alcanzar el valor de la consigna aunque se varíe el flujo de entrada, en un tiempo semejante, en la Tabla 11 se muestra como aumenta los valores de Mp y Ts para los valores de flujo evaluados en los resultados.

Tabla 11. Valores de sobreimpulso y tiempo de estabilización para diferentes flujos de entrada.

Flujo de (liquido) [kg/s]	Sobreimpulso Mp [%]	Tiempo de estabilización $t_{S2\%}$ [s]
0.97	0.5	300
1.25	10	340
3	21.667	400

En la Figura 41, se muestra una respuesta a 65°C, en este caso se cambio el valor de la consigna, el gráfico se observa que el sobre impulso se redujo a un valor de 4%, esto debido a que la temperatura final o de equilibrio, es mas cercana a los 72 grados a los que se encuentra el liquido al entrar en la calandria, con la misma respuesta se confirma que el sistema logra alcanzar un punto de equilibrio o set point ajustado por el usuario que es lo deseable, y por tanto se puede cambiar la temperatura dentro de el rango.

En la Figura 42 se muestra un gráfico proporcionado por la empresa contratante donde se muestra la temperatura de control del liquido a utilizar en la calandria, la señal se encuentra a 60 grados, la cual es la temperatura de operación normal del evaporador, la cual, como se muestra en el mismo gráfico se encuentra estable en el valor deseado. Como se expuso en el marco teórico, es necesario que la temperatura del segundo efecto sea menor que la temperatura del primero, para que la energía proveniente del calor en el primer efecto sea aprovechada en el segundo, otro detalle con respecto al liquido, es que al exceder los limites de temperatura, es decir que la leche dentro de la calandria empiece a hervir en vez de evaporarse, se empiezan a degradar las proteínas de la misma y por lo consiguiente se formaran obstrucciones dentro de los tubos de la calandria, es por ello que es importante mantener dicha temperatura y no sobrepasar la misma, esta mismo limite de la empresa contratante ha recomendado este valor limito como 75 °C.

Para el caso del lazo de flujo de agua de enfriamiento, se tiene un sistema de primer orden en el que la respuesta debe seguir valores entre 0 y 3.5 l/s de agua. En la Figura 43 se muestra la respuesta para el lazo con el compensador diseñado, se observa que este reacciona bastante rápido, pues el t_S=2s y un sobreimpulso de 0.7 %, el cual es bastante pequeño, para logra hacer una comparación se procedió a encontrar la respuesta del lazo, cuando este no posee un compensador, así con base en el diagrama de la Figura 44 se realiza la respuesta de la Figura 45, en la misma queda en evidencia que el sistema tiende a oscilar de manera violenta, esto al implementar el sistema sin el control correspondiente, este tipo de oscilación puede dañar el actuador Baumann de la válvula, es por ello que la respuesta se mejora considerablemente con el diseño de un condensador adecuado. Como se muestra en la Figura 43, al incorporar el controlador al sistema se mejora el sobre impulso, pero se sacrifica en un segundo aproximadamente la velocidad de respuesta del sistema, este comportamiento es preferible, pues una respuesta mas rápida involucra un sobreimpulso mayor y por lo tanto se puede poner en riesgo el hardware de la válvula de control.

En la Figura 46 se muestra una pantalla en la que el usuario puede configurar el valor del set point, se debe recordar que el proyecto expuesto forma parte de un proyecto mas grande que el que se debe automatizar toda la línea de producción de leche condensada, así que como parte del diseño se contemplo la realización de la pantalla

de ajuste de valores deseado, esta se encuentra en la computadora de operadores por medio del software Factory talk view site edition.

Otro detalle que hay que tomar en cuenta con respecto a la implementación sistema de control completo, es que como meta se trazo que el sistema debe evidenciar que es más rentable en cuanto a costos de inversión de puesta en marcha, que un equipo de evaporación nuevo, en la Tabla 10 se muestra el costo relativo al valor de un evaporador nuevo de cada uno de los rubros contemplados en el proyecto, el que corresponde a ingeniería, corresponde al costo del tiempo de un ingeniero referente a diseño y la puesta en marcha, el rubro de materiales cubre el costo de todo el material de construcción así como la parte de ensamblado de los gabinetes de control, y el rubro de otros contempla lo gastos de puesta en marcha(viáticos) así como imprevistos que puedan surgir. Si se compara la suma total de todos los rubros en igual a 0.087% del valor de un sistema de evaporación nuevo, lo cual evidencia efectivamente que es completamente rentable invertir en la etapa de control del sistema, y no en todo el equipo de evaporación, el cual implicaría un costo muy elevado.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Al modelar un sistema se pueden utilizar técnicas de análisis diferentes a las convencionales como construir un diagrama de bloques y utilizar un software de análisis matemático como scilab para determinar su comportamiento.

- La temperatura del líquido en el segundo efecto esta relacionada con la cantidad de vapor que se suministra a la calandria, lo cual a su vez se relaciona con la apertura de la válvula proporcional involucrada en el proceso.

- El valor del sobreimpulso y el tiempo de estabilización en la temperatura del líquido del segundo efecto, esta directamente relacionados con la cantidad de flujo de líquido suministrado, a mayor flujo de líquido mayor tiempo de estabilización y por lo tanto mayor sobreimpulso.

- Al cambiar el valor de la consigna de entrada en el lazo de control de temperatura, es posible cambiar la temperatura de evaporación del líquido a evaporar.

- Al incorporar un controlador en el lazo de agua de enfriamiento se mejora la respuesta, por lo tanto se reduce el sobreimpulso, que en este caso puede dañar el actuador mecánico.

- En cuanto a costo es más rentable invertir en el sistema de control, que en un sistema de evaporación nuevo, si se cuenta con un equipo ya existente.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda que la computadora de operadores donde se encuentra en software FT view, este protegido con contraseñas, para evitar que cualquier particular cambie los valores de las consignas.

- Es recomendable no superar la temperatura de 75 en el segundo efecto del evaporador, para evitar que las proteínas se degraden y se produzcan obstrucciones en los tubos de la calandria.

- Se recomienda hacer un análisis de cuanto es el flujo máximo de entrada de leche al evaporador para determinar una relación con respecto al sobreimpulso y evaluar cuando se den casos críticos en el funcionamiento del sistema.

Bibliografía

[1] Tecnología de la leche en polvo, por Vagn Westergaard, GEA NIRO A/S Copenhague, Dinamarca.

[2] fundamentos de evaporadores [En línea] http://www.che.ttu.edu/pcoc/publications/AIChE04/aiche04Pulp.pdf [Consulta 9 octubre 2010].

[3] ecuaciones y modelos de transferencia de calor en evaporadores [En línea] http://profdoc.um.ac.ir/articles/a/1014309.pdf [Consulta 9 octubre 2010].

[4] Evaporadores de película descendente de GEA niro. [En línea] http://www.niroinc.com/evaporators_crystallizers/dairy_falling_film_evaporators.asp [Consulta 9 octubre 2010].

[5] Información técnica sobre evaporadores scheffer. [En línea] http://www.genemco.com/catalog/pdf/sheffers4v2effectevaporator.pdf [Consulta 9 octubre 2010].

[6] Tecnología de evaporación, GEA [En línea] http://www.geape.com.cn/gpcn/cmsresources.nsf/filenames/Evaporation%20Technology.pdf/$file/Evaporation%20Technology.pdf [Consulta 9 octubre 2010].

[7] Rosemount, información sobre transmisores e instrumentación. [En línea] http://www.emersonprocess.com/Rosemount [Consulta 8 Noviembre 2010].

[8] Allen Bradley. [En línea] http://www.ab.com [Consulta 8 Noviembre 2010].

[9] Kuo, Benjamín. C. *Sistemas de Control Automático.* 7ª edición. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.

[10] Información sobre respuesta de diferentes transmisores [En línea] http://www.instrumentacionycontrol.net/es/curso-sintonizacion-controladores/384-multiple-lag-time-multiples-retardos-en-nuestros-procesos-e-instrumentos-.html [Consulta 9 octubre 2010].

[11] pagina de la empresa sistemas IQ [En línea] www.sistemas-iq.com [Consulta 9 octubre 2010].

Apéndices

A.1 Abreviaturas

Abreviaturas:

- PID: Controlador proporcional-integral-derivativo.
- PI: Controlador proporcional-integral.
- HMI: Módulo de interfaz humana, por sus siglas en inglés.
- PLC: Controlador lógico programable.
- TT: transmisor de temperatura.
- PI&D: diagrama de tuberías.
- PAC: Controlador programable de automatización

A.2 Programa implementado en el PLC para el control de los lazos

A.2.1 Llamadas a subrutinas

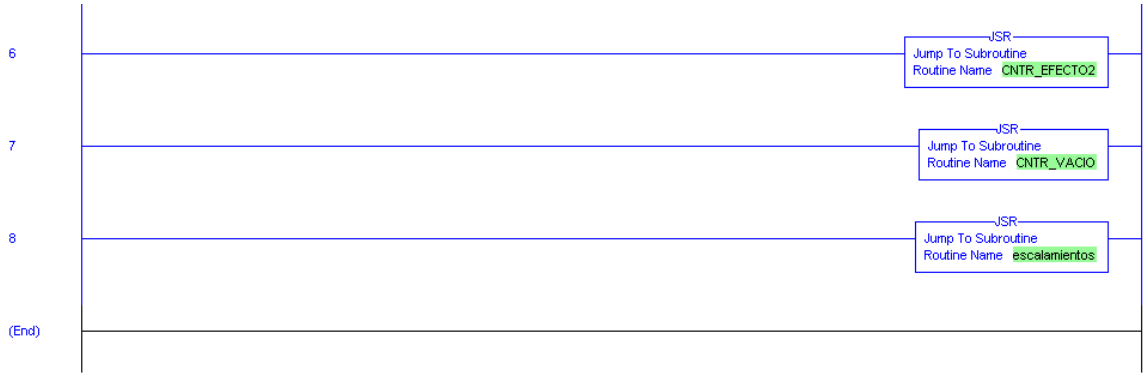

Figura A.2.1 Bloque de programación para el manejo de válvulas.

A.2.2 CONTROL DE TEMPERATURA

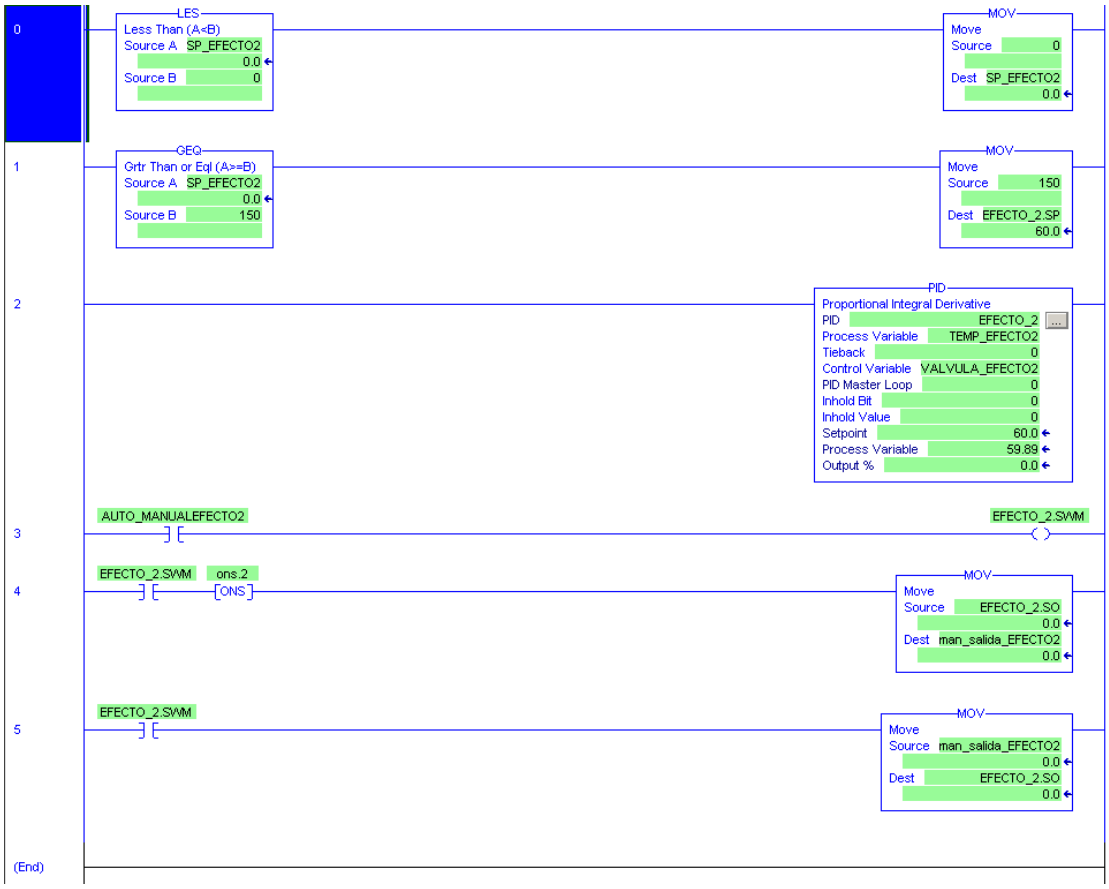

Figura A.2.2 Bloque de programación para el manejo de válvulas.

A.2.3 Llamadas a subrutinas

Figura A.2.3 Bloque de programación para el manejo de válvulas.

A.2.4 Llamadas a subrutinas

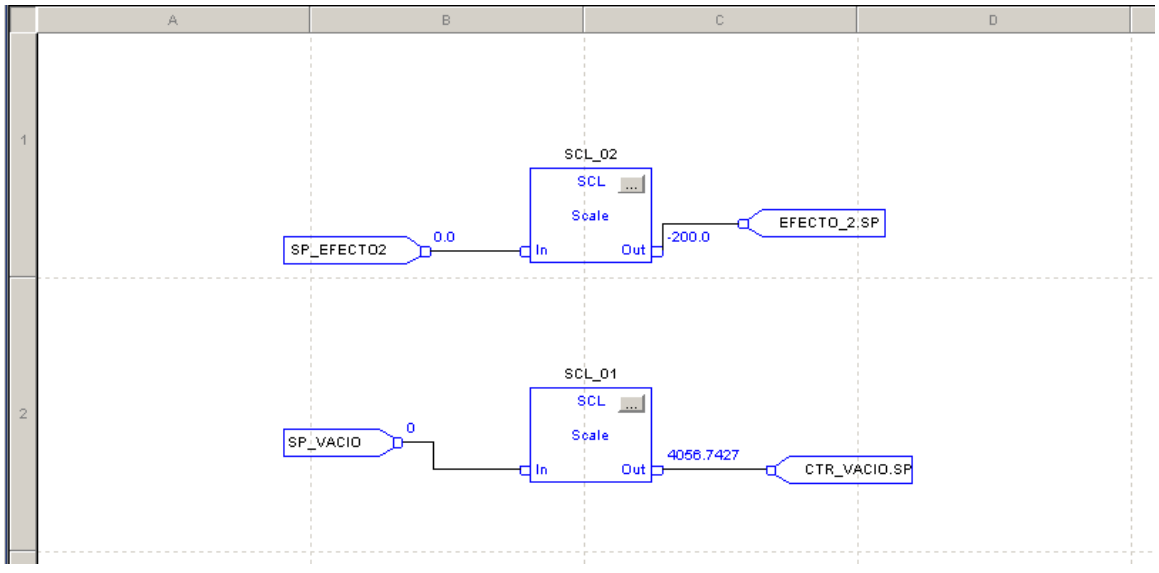

Figura A.2.4 Bloque de programación para el manejo de válvulas.

A.3 Información sobre la empresa/institución [11]

A lo largo de más de 12 años la División de Automatización de la empresa ELVATRON S.A desarrolló una variedad interesante de proyectos diferentes, uniendo para tal fin, tecnologías y marcas de clase mundial, con el aporte de ingeniería netamente nacional.

A partir de Octubre de 2004, todo este conocimiento, personal y metodología de trabajo está disponible bajo una nueva compañía denominada SISTEMAS IQ, S.A., cuya misión es el suministro de servicios de Ingeniería en el campo de la automatización, control y proyectos llave en mano.

Visión

Consolidar nuestra posición de liderazgo en soluciones de automatización industrial y afines, en el área de Centroamérica y el Caribe.

Misión

Procurar que nuestros clientes produzcan y operen a un nivel óptimo, a través de nuestras soluciones ejecutadas con el mejor equipo humano, utilizando las mejores marcas y conforme a estándares propios e internacionales. Ajustados a las buenas prácticas de manufactura e ingeniería.

Valores

- El actuar con transparencia es la base de nuestro trabajo. Y la **HONESTIDAD** nos brinda la tranquilidad necesaria para afrontar con éxito nuestros retos.
- Rigurosos con los **COMPROMISOS** que adquirimos con nuestros clientes, proveedores, compañeros y nosotros mismos. La PUNTUALIDAD es la forma más básica de **RESPETO**.
- Buscamos la **INNOVACIÓN** que, unida a nuestra experiencia, nos permite entregar mejores soluciones a nuestros clientes.
- Afrontamos nuestros retos y tareas con buen humor y una **ACTITUD POSITIVA** orientada a obtener buenos resultados.
- Creemos en nuestra gente y en su capacidad de **SUPERACIÓN**, tanto profesional como personal. Valoramos la formación integral en procura de conocerse a sí mismo y al entorno.
- La empresa como parte de la comunidad y en procura de su desarrollo, es **RESPONSABLE** tanto social como ambientalmente.

Información General

Los datos de nuestra empresa, incluyendo los proyectos realizados bajo la razón social de Elvatron S.A., son:

Capital: Costarricense
Número de empleados: 32
Personal Técnico: 90%

Áreas operativas: Integración de sistemas, servicio técnico y entrenamiento.

Especialidad: Integrar sistemas de control e instrumentación electrónicos en maquinaria de manufactura ó industria de proceso, utilizando tecnología de avanzada en el campo de automatización, con desarrollo de ingeniería a nivel local, respetando normas de calidad y seguridad internacionales, y desarrollando paquetes completos "llave en mano" con calidad mundial a costos razonables.

Mercado de trabajo: Industrias de manufactura y proceso como Tabaco, Edificios Inteligentes, Llantas y Hule, Alimentos y Bebidas, Petróleo, Cemento y Generación Eléctrica.

Anexos

MODO DE OPERACIÓN MANUAL DEL EVAPORADOR DE LCA

ESTERILIZACION:

Puesta en marcha del SCHEFFER`S #1

Poner agua desde la tina flotadora para obtener condiciones con agua en los pasteurizadores. Arranque la bomba tina flotadora y pasteurizadores e inicie inyección de vapor en los pasteurizadores. La presión de vapor debe ajustarse a 60 psi. Para esterilizar, la temperatura de los pasteurizadores debe ajustarse a 100 ºC en el primer y segundo pasteurizador. Desviar el agua hacia el desagüe a la salida del segundo pasteurizador.

1. Arranque las bombas de extracción de agua de condensado:
    - Agua condensada de los pasteurizadores
    - Agua condensada I efecto
    - Agua condensada II efecto
    - Agua condensada del condensador
2. Pedir agua desde la bomba alimentación producto:
    - Arranque la bomba alimentación
    - Higienizadora debe estar lista para recibir agua y desviar hacia la tina flotadora
3. Desvíe el agua a la salida del segundo pasteurizador hacia la tina de espera. Abra la válvula desareadora o alivio de la tina de espera. Arranque la bomba tina de la espera. Luego arranque nuevamente las bombas del I efecto (1era y 2da sección). Arranque bomba waukesha y recircule agua en el II efecto.
4. Abra válvula de vapor A y B y espere unos minutos hasta obtener temperaturas de aprox. 100 ºC en los efectos para desviar entonces el agua para esterilizar el equipo de enfriamiento.
5. Deje las válvulas de desareación del I y II efecto abiertas, ciérrelas una vez culmine la esterilización. Deje salir agua de esterilización a través de la válvula toma muestra a la salida del II efecto.
6. Anote el tiempo de esterilización en el registro 0219-MF-F11.038 (Vea anexo 1). La esterilización será de 1 hora a partir de lograr 100 ºC en los efectos. Se tomará entonces una muestra del enjuague de esterilización para bacteriología. Después de terminar la esterilización, desvíe el agua al drenaje a la salida del segundo pasteurizador. Cierre válvula de alivio o desareación, cierre válvula de vapor A y B. Apague la bomba tina de espera, I efecto (1era y 2da sección) y bomba waukesha.

Nota: En caso que se utilice agua de la torre o la del pozo, asegúrese de colocar la válvula de retorno de agua al condensador en la posición correcta. Tenga presente que al esterilizar, si se utiliza agua de la torre, es mejor cerrar la válvula de retorno hacia la torre y abrir hacia el pozo para evitar un sobrecalentamiento en la tubería de retorno. Cambie inmediatamente hacia la torre una vez inicie el ciclo de producción con producto.

5.3- Esterilización del Equipo de Enfriamiento, tanques de Inoculación de Lactosa, Bombas y Filtros.

a- Asegúrese de tener todo el equipo bien limpio y armado.

b- El operador del SCHEFFER`S notificará al encargado del equipo de enfriamiento que procederá a enviar agua para esterilizar todo el equipo de enfriamiento. Tenga todas las válvulas en la posición correcta, incluyendo las del enfriador Alfa Laval, para realizar la adecuada esterilización del equipo. Además, inicie inyección de vapor directo colocando la manguera con vapor en la parte superior del tanque intermedio. Evacue el agua caliente usando las bombas instaladas. Pasada 1 hora de circulación de agua caliente a 85-90ºC, se tome la muestra de bacteriología a la salida de los filtros (ubicados antes de los tanques de almacenamiento). Asegúrese que no quede agua almacenada en el equipo esterilizado. Suspenda la inyección de vapor y prepare el equipo para recibir producto como descrito en el instructivo 0219-MF-I11.025.

5.4 - Esterilización de los tanques de almacenamiento IA/IB de LCA.

a- Efectúe la limpieza de los tanques como descrito en el instructivo 0219-MF-I11.028.

b- Arme correctamente la instalación y prepare para esterilizar antes de usar nuevamente los tanques.

c- Existen 2 mangueras enroscables para la aplicación directa de vapor a las tuberías y tanques de almacenamiento. Esterilice por espacio de 1 hora de utilizar las 2 mangueras con vapor (una colocada en la parte superior del tanque y la otra colocadas a través de las tuberías de interconexión inferior de los tanques). Esterilice por espacio de 1½ hora en caso de utilizar una manguera (colocada en la parte inferior). Notifique al supervisor en turno para que anote el tiempo de esterilización en el registro 0219-MF-F11.038 y para que se tome la muestra de bacteriología.

Nota: Al ser esterilizada las tuberías deben dejarse flojas para evacuar el condensado formado y apretar inmediatamente antes de depositar LCA. Siga las instrucciones del instructivo 0219-MF-I11.025 para el almacenamiento de LCA en los tanques IA/IB.

MODO DE OPERACIÓN MANUAL DEL EVAPORADOR DE LCA

PRODUCCION:

5.1- Condiciones de Operación con Producto:

Vea instructivo 0219-MF-I11.022-02 sobre Esterilización del SCHEFFER`S # 1 antes de iniciar el proceso de producción. Vea anexo 1- Diagrama de Flujo en la Fabricación de LCA.

Una vez termine de esterilizar el evaporador:

a- Proceda a abrir eyectores para la obtención de vacío. Abra la llave de agua de enfriamiento. No iniciar proceso si el vacío no alcanza las condiciones pre-establecidas.

b- La temperatura en los pasteurizadores debe ajustarla a 95-100ºC en el primer pasteurizador y 112-114 ºC en el segundo pasteurizador.

c- Solicite entonces la leche fresca estandarizada desde el tanque, evacue el agua de los pasteurizadores y cambie válvula hacia la tina de espera una vez llegue producto. Toma aproximadamente 4 minutos y 15 segundos a la leche hacer el recorrido. Abra inmediatamente la válvula de alivio o desareación (seguridad) en la tina de espera y solicite vapor sonando 2 timbres al operador de calderas. Nota: Se ha instalado tubulares de retención a la salida del II pasteurizador con un tiempo de estancia de 15 segundos.

d- Arranque entonces la bomba tina de espera inmediatamente llegue producto a la tina.

Nota: tenga cuidado con el flujo de entrada a la tina de espera. Regule el flujo a la entrada de la tina de espera con la válvula instalada para evitar que se sobrellene.

e- Regule el flujo de leche entre 3,000-4,000 Litros/hora en el rotámetro utilizando el controlador de flujo a la salida de la tina de espera. Incremente hasta 5,000 L/h de acuerdo a las condiciones de operación del SCHEFFER`S y obtención del ºBrix.

f- Arranque entonces la bomba del primer efecto sección 1 y primer efecto sección 2.

g- Abrir válvulas de vapor A,B y C- y Bypass. Válvula A y B alimenta vapor al I efecto sección 1 y 2, válvula C alimenta vapor al II efecto. Suministro de vapor debe estar en el rango de 10-12 Kg./cm2 de presión tanto para el I como para el II efecto. Compruebe dicha presión en el tablero de control.

h- Inmediatamente después de abrir válvulas de vapor, abra lentamente válvula mariposa IV, lo cual a su ves alimenta con vapor al precalentador.

i- Arranque la bomba waukesha y asegúrese de tener las válvulas en posición correcta de tal manera que la leche recircule en el II efecto.

j- Una vez se cumplan las condiciones adecuadas, proceda a cerrar eyector auxiliar y secundario.

k- Llene el reporte correspondiente en la hoja de condensación de leche azucarada, registro 0219-MF-I11.022-01 (Ver anexo 2), el cual estipula también las condiciones prescritas de operación, así como fue mencionado al inicio de este instructivo.

Nota: Tenga presente la cantidad de leche estandarizada en el tanque de almacenamiento de leche fresca de tal manera que pueda calcular el tiempo de alimentación con producto al evaporador. En la práctica toma aprox. 1 hora 40 minutos para una masa de 6,500 lts. Leche estandarizada y 1 hora 25 minutos para masa de 5,500 Lts. para proceder entonces a realizar el corte de masa. Es importante que el supervisor en turno notifique al operador del evaporador cualquier adición de recondensado o reproceso que varía el volumen inicial de leche azucarada.

l- El brix empezará a incrementarse a medida que se evapora producto. El mismo debe incrementarse hasta 70.0-70.5% luego lo debe mantener en ese rango. Para tal efecto utilice la llave reguladora de flujo para mantener el brix en control (aumentando el flujo reduce el brix o ruduciendo el suministro de vapor cerrando un poco la válvula C).

m- En caso de que se llene la tina flotadora de producto, pare la bomba alimentación de producto hasta bajar al nivel deseado.

n- Al finalizar la fabricación de una masa o lote de condensada meta agua desde la bomba alimentación producto. Bypassear el agua desde la higienizadora a la tina flotadora usando la válvula que envía al drenaje. Tomará 1 minuto 45 seg. En hacer este recorrido. Esperar hasta que se acabe la leche en la tina flotadora y abrir inmediatamente la llave de agua para sacar el producto de los pasteurizadores, (toma aprox. 0-1 minuto). Utilice la válvula de tres vías a la salida de los pasteurizadores para sacar el enjuague.

ñ- Cierre la válvula de seguridad (de alivio) en la tina de espera y observe hasta que se termine la leche en tina de espera (aprox. 0-1 minuto). Al terminar, cierre vapor al primer efecto válvulas A y B, cierre la válvula controladora de flujo a la tina de espera, cierre la válvula mariposa IV. Apagar bomba tina de espera, y I efecto (1era y 2da sección).

o- En este punto, se mantiene vapor aplicado al II efecto permaneciendo la válvula C abierta donde la LCA recirculará hasta obtener el brix. Recuerde el factor de corrección +0.5 en muestras analizadas a aprox. 25 ºC en el refractómetro. Una vez el brix alcance 72.5% +0.5 factor de corrección suspenda el suministro de vapor cerrando bypass y la válvula C. Desvíe con las válvulas adecuadas la LCA hacia el tanque intermedio para ser enfriada. Mida la viscosidad con el viscosímetro de la LCA tomando una muestra a la

salida del II efecto. Al terminar la masa toque 4 veces el timbre para avisar al operador de calderas que ha finalizado una masa o lote de LCA.

Nota: Como normas para llenaje se pide que las viscosidades estén entre 20-30 STV para formato de 397 g. y entre 14-20 STV para formato de 100g. Al medirlo con el viscosímetro de producción. Hable con el supervisor en turno acerca del uso del viscosímetro. En caso de viscosidades bajas, ver el punto 4.2- que se refiere a técnicas para incrementar la viscosidad de la LCA.

p- Cierre la llave de agua de enfriamiento para descargar el producto.

q- Apague la bomba waukesha después de descargar.

Ver anexo de 2. Diagrama de Flujo en la fabricación de Leche Condensada azucarada

5.2- Sobrecalentamiento:

Nota: Una de las técnicas para incrementar la viscosidad de la LCA es el uso del sobrecalentamiento y debe aplicarse si la viscosidad obtenida se encuentra por debajo de las normas establecidas.

Si se solicita sobrecalentar la LCA proceda de la siguiente manera:

- Después de evacuar la tina de espera, repita lo mismo como lo descrito en el punto ñ. Toque 3 timbres al operador de calderas para avisar que va a sobrecalentar el producto. Dejando suministro de vapor en el II efecto (válvula C abierta), cierre inmediatamente el agua de enfriamiento y abra eyectores secundarios y auxiliar al menos 1 minuto antes que descargue la tina de espera.
- La temperatura en el II efecto incrementará de aprox. 56 ºC hasta 68-75 ºC. No incremente a más de 75 ºC para evitar el riesgo de separación de grasa. Sobrecaliente de acuerdo al tiempo estipulado por el supervisor en turno. Es aconsejable no sobrepasar más de 30 minutos de sobrecalentamiento.
- Al finalizar sobrecalentamiento abra el agua de enfriamiento lentamente hasta alcanzar temperatura de 60-50ºC en el II efecto, inmediatamente cierre eyectores secundario y auxiliar.

  Nota: Tenga cuidado al enfriar el producto y evite meter agua demasiado rápido. Esta práctica puede producir turbulencia y enviar producto al condensador y de allí a las calderas ocasionando contaminación de la misma.

- Finalice ajustando el brix adecuado y midiendo la viscosidad obtenida. Desvíe la LCA hacia el equipo de enfriamiento como descrito anteriormente.

Nota: Cuando termine de descargar el producto, tenga el evaporador listo para la fabricación de otro lote de condensada. Se debe mantener las temperaturas de pasteurización del proceso, abrir eyectores y abrir la válvula de agua de enfriamiento del condensador. Recuerde poner en posición cerrada la llave que desvía leche hacia el equipo enfriamiento y abierta la que recircule producto hacia el II efecto.

5.3- Medidas e Instrucciones de Seguridad establecidas:

La destreza de poner a funcionar correctamente el evaporador involucra varias semanas de entrenamiento al operador de tal manera que se le pide al mismo tome el adiestramiento adecuado.

A continuación se enumeran algunas medidas de seguridad importantes cuando se pone en marcha el evaporador:

a- Nunca ponga el vapor antes de haber obtenido el vacío acostumbrado en el tiempo normal.

b- Mantenga la rata de alimentación de leche en 4,000-5,000 Lts./hora. Una rata baja de alimentación de leche para el I efecto tiene por consecuencia una pobre carga en el siguiente efecto, con la posibilidad de que esta se pegue en los tubos.

c- Nunca opere con la temperatura del II efecto muy bajas. Debe operar entre 52-58 ºC.

d- En caso de problemas tales como fallas de fluido eléctrico, caídas de vapor, fallas en el suministro de agua de enfriamiento, paradas de bombas o roptura de un cristal de observación cierre inmediatamente la válvula de vapor del termocompresor y limpie el evaporador si es necesario.

e- El agua de condensado extraídas por los pasteurizadores, I y II efecto y el condensado del condensador tienen una línea acoplada de tal forma que se deposita en el tanque de almacenamiento (reciclaje) agua condensado, para ser luego transferidos hacia las calderas. Tenga mucha precaución de no mandar agua contaminada hacia las calderas. En caso de darse algún problema con el agua de condensado utiliza las llaves de seguridad que desvían agua contaminada hacia el drenaje. Durante la limpieza química abra todas las válvulas de agua de condensado hacia el drenaje.

Ultimas instrucciones:

Cuando todas las temperaturas son muy altas y estas no pueden ser disminuidas, puede ser producto de:

a- Escape de aire en la instalación (instalación no está hermética).

b- Un mal funcionamiento del condensador (la temperatura del agua de enfriamiento o el agua no es suficiente).

c- Una mala operación de los eyectores.

d- Una mala descarga de la condensación (mala operación de las bombas de condensación).

Cierre de operación al terminar el ciclo de fabricación:

a- Higienizadora (siga las instrucciones operacionales descritas en el instructivo 0219-MF-I11.023 sobre fin de producción y preparación para la limpieza CIP).

b- Cierre vapor para el equipo de pasteurización y termocompresor y parar las bombas de descarga de agua condensado.

c- Proceda a enfriar la instalación circulando agua limpia a alto vacío por 10 minutos.

d- Rompa el vacío abriendo las válvula en los conductores de vapor.

e- Cierre la alimentación de vapor a los eyectores.