

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y
FORMALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**“MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL
EVAPORADOR DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE LECHE
EVAPORADA DE LA EMPRESA GLORIA S.A. – SEDE
AREQUIPA”**

Tesis presentada por el Bachiller:

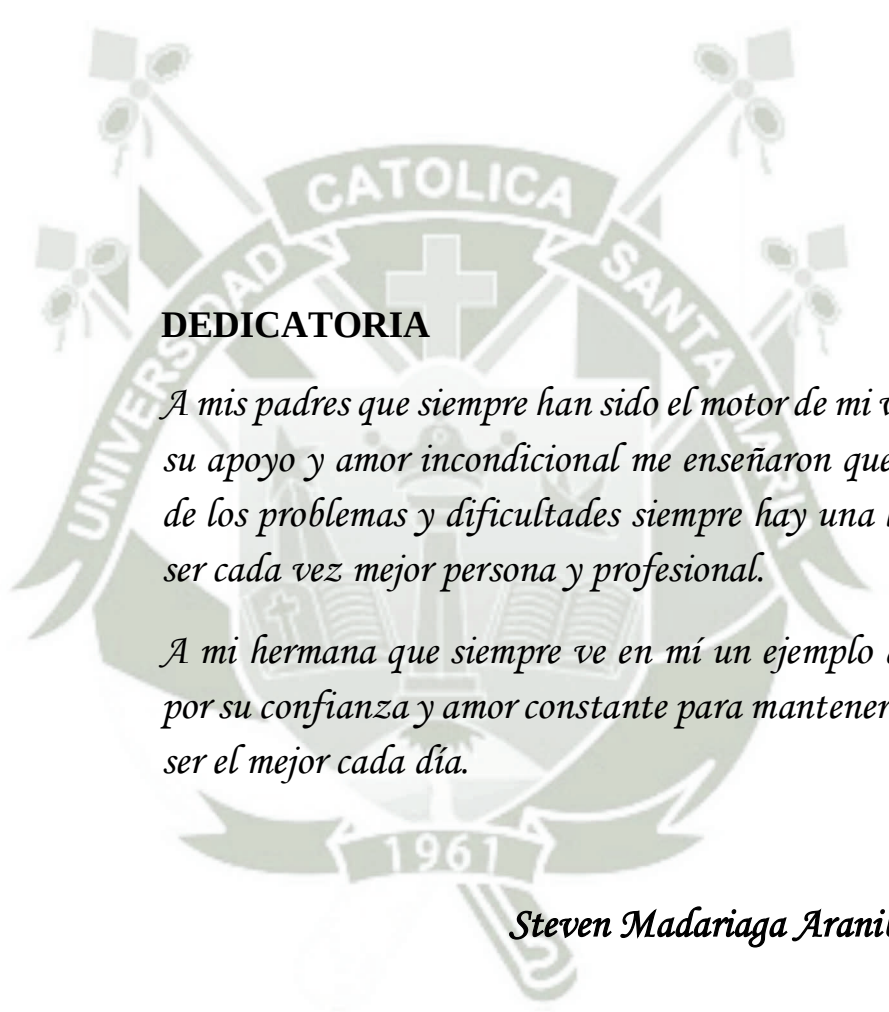
MADARIAGA ARANIBAR, Steven Alonso

**Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

ASESOR: Ing. Cesar Málaga Chávez

Arequipa - Perú

2017



DEDICATORIA

A mis padres que siempre han sido el motor de mi vida, con su apoyo y amor incondicional me enseñaron que a pesar de los problemas y dificultades siempre hay una luz para ser cada vez mejor persona y profesional.

A mi hermana que siempre ve en mí un ejemplo a seguir, por su confianza y amor constante para mantener mi fe en ser el mejor cada día.

Steven Madariaga Aranibar

AGRADECIMIENTO

A la empresa Gloria S.A. por permitirme poder aplicar mis conocimientos y explotarlos al máximo para así poder llegar a ser un mejor profesional a través de las personas que conforman esta grande empresa que a su vez pudieron compartir su experiencia conmigo, de igual manera por haberme dado la oportunidad de poder realizar esta tesis y la experiencia que implica concluir la.

A la Universidad Católica Santa María de forma especial a los docentes que conforman la carrera de Ingeniería Electrónica, por haberme inculcado los conocimientos necesarios para poder llegar ser el profesional que el día de hoy soy.

Steven Madariaga Aranibar

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Objetivo General.	4
1.2. Objetivos Específicos	5
1.3. Alcances	5
1.4. Limitaciones	5
1.5. Justificación del Estudio	6

CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Evaporadores de Capa Descendente.	7
2.1. 1. Definición de distintas cantidades específicas y el correspondiente diagrama de flujo de calor.	11
2.2. Re-compresión Térmica de los Vahos (RTV)	15
2.3. Separadores con Entrada Tangencial de los Vahos.....	22
2.4. Equipo de Condensación	22
2.5. Sistemas de Control de Bombas de Vacío	23
2.6. Variadores de Frecuencias Ajustable.....	24
2.7. Automatización de Procesos Industriales con Controlador Lógico Programable PLC.....	24

CAPÍTULO III INGENIERÍA DE DETALLE

3. INGENIERÍA DE DETALLE	25
--------------------------------	----

3.1. Descripción de los Requerimientos a Controlar	25
3.2. Descripción de Equipos y Software a Utilizar para el Control	
"Hardware".	27
3.2.1. Arquitectura de Red	27
3.2.2. Sensores y Transmisores de Señal	29
3.2.3. Sensor de Temperatura (RTD BURNS)	30
3.2.4. Sensor de Presión (Diferencial de Presión FMD78 Endress + Hauser)	32
3.2.5. Válvulas de Control	34
3.2.6. Flujómetro Magnético	36
3.2.7. Bomba de Leche Fristam	37
3.2.8. Variador de Velocidad Power Flex	38
3.2.9. PLC (Compactlogix L32E) Allen Bradley	39
3.2.10. Software RSLOGIX 5000	39
3.2.11. Scada Intouch	40

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

4. IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN	43
4.1. Control de lazo cerrado y función de transferencia	44
4.2. Método de la curva de reacción de ZIEGLER-NICHOLS	46
4.2.1. Diseño de la etapa de controlador del lazo de vapor.	48
4.2.2. Diseño del SCADA –INTOUCH del Sistema Evaporador	62

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS, OPERACIONALIZACIÓN DE RESULTADOS Y FINANCIAMIENTO

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS, OPERACIONALIZACIÓN DE RESULTADOS Y FINANCIAMIENTO	84
5.1. Análisis de Resultados	84
5.2. Optimización de Operaciones	86
5.3. Financiamiento	89

5.3.1. Costos de Implementación	90
CONCLUSIONES.....	91
RECOMENDACIONES	92
GLOSARIO.....	93
BIBLIOGRAFÍA.....	95
WEBGRAFIA	95
ANEXOS.....	98



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	Diagrama PID del Sistema de Evaporación de 3 Efectos (Etapas).	3
Fig. 2.	Evaporador de película descendente de recirculación.	8
Fig. 3.	Evaporación de un tubo de un evaporador de película descendente	9
Fig. 4.	Calandria del evaporador	10
Fig. 5.	Evaporador de una etapa.	11
Fig. 6.	Los principios de la evaporación de agua en dos etapas.	15
Fig. 7.	Termo compresor	15
Fig. 8.	Evaporador de dos etapas con compresión térmica.	16
Fig. 9.	Diagrama de flujo de calor.	16
Fig. 10.	Compresión mono-térmica. Evaporación RTV de 7 efectos	20
Fig. 11.	Compresión politérmica. Evaporación RTV de 7 efectos	21
Fig. 12.	Separador con entrada tangencial.	22
Fig. 13.	Arquitectura del Sistema.....	27
Fig. 14.	Sensor de Temperatura RTD Burns	32
Fig. 15.	Sensor de Presion Diferencial	32
Fig. 16.	Tipos de presion	32
Fig. 17.	Proceso de presión Diferencial	33
Fig. 18.	Características del sensor diferencial de presión	34
Fig. 19.	SPIRAX SARCO LEA31	35
Fig. 20.	Posicionador de valvula TZIDC	36
Fig. 21.	Características Flujómetro Magnético	37
Fig. 22.	Bomba FRISTAM	37
Fig. 23.	Variador de velocidad Power Flex	38

Fig. 24. PLC CompactLogix	39
Fig. 25. RsLogix 5000	40
Fig. 26. Configuración de enlace PLC –Intouch.....	42
Fig. 27. Diagrama de bloques del control de lazo cerrado	45
Fig. 28. Determinación de las constantes T y L en forma gráfica.	47
Fig. 29. Hoja técnica y características de la Válvula Proporcional	49
Fig. 30. Modelado de Válvula Proporcional.....	49
Fig. 31. Diagrama de bloques de modelo de la válvula.	50
Fig. 32. Performance de transmisor TMT 182	51
Fig. 33. Esquema para el balance de energía en la calandria.	53
Fig. 34. Diagrama de bloques del evaporador	57
Fig. 35. Método de la curva de reacción de ziegler nichols aplicado al sistema.	60
Fig. 36. Diagrama de bloques completo con el compensador PID	62
Fig. 37. Arquitectura de Red Insutrial	62
Fig. 38. Paso 1 de Implementación	64
Fig. 39. Selección de PLC en Software.....	64
Fig. 40. Implementación Hardware	65
Fig. 41. Variable Salida Análoga	66
Fig. 42. Variable de salida Análoga.....	66
Fig. 43. Creación ranura de Salida Analógica.....	67
Fig. 44. Selección de Entrada Análoga	67
Fig. 45. Implementación de PID.....	68
Fig. 46. Implementación Bloque PID	68
Fig. 47. Implementación Bloque PID	69
Fig. 48. Implementación Bloque PID	69

Fig. 49. Implementación Bloque PID	70
Fig. 50. Implementación Bloque PID	70
Fig. 51. Implementación Bloque PID	71
Fig. 52. Asignación de valores PI	71
Fig. 53. Asignación de valores PI	72
Fig. 54. Asignación de valores PI	73
Fig. 55. Variable ScadaSetTemp	73
Fig. 56. Variable ScadaSetTemp	74
Fig. 57. Asignación de direcciones IP de control	75
Fig. 58. System Managment Console	75
Fig. 59. System Managment Console	76
Fig. 60. Creación Evaporador en SMC.....	76
Fig. 61. Creación de Enlace.....	77
Fig. 62. Comunicación Intouch - PLC.....	77
Fig. 63. Comunicación Intouch - PLC.....	78
Fig. 64. Configuración SMC	78
Fig. 65. Configuración SMC	79
Fig. 66. Asignación de gráficos.....	79
Fig. 67. Asignación del Text Edit del set point	80
Fig. 68. Asignación del Text Edit del set point	80
Fig. 69. Programación Variable de Control de Temperatura.....	81
Fig. 70. Programación Variable de Control de Temperatura.....	81
Fig. 71. Programación Variable de Control de Temperatura.....	82
Fig. 72. Sistema final.....	82
Fig. 73. Estabilidad de la temperatura en el Tiempo	85
Fig. 74. Funcionalidades de Commander 250	87

Fig. 75. Ejemplo de fallas recurrentes	88
Fig. 76. Historial del monto gastos por Mantenimiento	88
Fig. 77. Historial de la disminución de consumo de repuestos	89



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Concentraciones de Evaporación	11
Tabla 2.	Valores de Consumo Energético	13
Tabla 3.	Valores de Ebullición	14
Tabla 4.	Datos correspondientes al vacío requerido para una determinada temperatura de ebullición	26
Tabla 5.	Descripción de las variables del proceso	28
Tabla 6.	Rangos de temperatura para diferentes RTD Burns.	31
Tabla 7.	Relaciones para determinar las constantes en los controladores P, PI y PID.	48
Tabla 8.	Valores calculados constantes del modelo del Evaporador	59
Tabla 9.	Asignación de direcciones IP de control	74
Tabla 10.	Cotización de equipos	90

RESUMEN

Gloria S.A. es una empresa líder en el mercado lácteo desde hace 75 años que cuenta con una gama de equipos especializados para poder procesar la materia prima como lo es la leche, un equipo importante dentro de este proceso es el evaporador de 3 efectos, encargado de la deshidratación y tratamiento térmico de la misma, generando por lo tanto la conversión de la leche en un concentrado que se deriva finalmente en leche evaporada.

Se necesita por lo tanto un sistema de control automatizado para poder controlar el proceso de evaporación, enfocado en la instrumentación y equipos necesarios para poder realizar este ciclo sin alterar las propiedades de la leche de forma tal que interrumpa el proceso y se generen pérdidas.

El sistema de control actual que presenta la planta de Gloria S.A. en la ciudad de Arequipa presenta controles aislados que generan inversiones constantes debido al reemplazo de estos controladores y de la instrumentación obsoleta que solo exige un mayor control de personas para poder realizar la operación del equipo en su totalidad.

En esta tesis se plantea la adquisición de un sistema de instrumentación completo para reemplazo de equipos obsoletos al igual que un sistema controlado con PLC para poder mejorar la operación y el control del sistema total de evaporación.

Palabras claves: Evaporador, temperatura, instrumentación, PLC.

ABSTRACT

Gloria S.A. Is a leader in the dairy market for 75 years and counts to be able to process the raw material such as milk with a range of equipment specialized in this process as is the evaporator of 3 effects that is the plant in Arequipa Is responsible for the dehydration of the milk, thus generating the conversion of the milk into a concentrate that is finally derived in evaporated milk.

An automated control system is therefore needed to control the evaporation process, focusing on the instrumentation and equipment necessary to perform this cycle without altering the properties of the milk in a way that interrupts the process and generates losses.

The current control system presented by Gloria S.A. In the city of Arequipa presents isolated controls that generate constant investments due to the replacement of these controllers and obsolete instrumentation that only requires a greater control of people to be able to perform the operation of the equipment in its entirety.

This thesis proposes the acquisition of a complete instrumentation system to replace obsolete equipment as well as a control with PLC in order to improve the operation and control of the total evaporation system.

Keywords: Evaporator, temperature, instrumentation, PLC

INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad constante de innovación e implementación de equipos para la modernización de procesos, es importante tener una base sólida de conocimientos acerca del proceso a automatizar y los requerimientos del mismo.

La empresa Gloria S.A. trabaja en la fabricación de productos lácteos desde el año 1941, para ello cuenta con diversos equipos para la evaporación y envasado de la leche, en nuestro desarrollo se requirió mejorar el proceso de evaporación directamente al evaporador de 3 efectos y contribuir a la automatización del mismo para mejorar su eficiencia y control. La evaporación en la industria de los lácteos está enfocada 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 evaporada en lata.

En este documento se presenta una solución basada en la automatización de la etapa de evaporación en el evaporador, con ello poder controlar la presión de vapor y el vacío dentro del evaporador.

En la etapa de planteamiento del problema nos centramos a la explicación de la realización del proyecto con miras a generar la automatización.

En la etapa de marco teórico se analiza el funcionamiento del evaporador de película descendente y las características especiales que posee este equipo. En la etapa de ingeniería de detalle se analiza los requerimientos, instrumentos y equipos que debe poseer el sistema para poder generar un control y automatización necesarios para su correcto funcionamiento.

En la etapa de control automático se analiza el detalle del control de lazo cerrado que requiere la primera etapa del evaporador.

Finalmente, en la etapa 7 y 8 daremos las conclusiones y recomendaciones para el correcto funcionamiento del sistema.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, el parque industrial de nuestro medio se caracteriza por tener en sus instalaciones equipos que ya cumplieron con su vida útil o en todo caso equipos que no están acorde con los índices de productividad requeridos. Asimismo se deben considerar los avances tecnológicos en estos últimos años que permiten tener al alcance técnico y económico dispositivos y equipos de última generación. Por tanto las empresas ven en esta situación la necesidad de elevar la productividad de sus plantas, entre otras posibilidades, mediante la modernización total o parcial de las mismas migrando a tecnologías modernas, las cuales están encaminadas en la automatización de los procesos productivos.

Tal es el caso de la planta de producción de lácteos de la empresa Gloria S.A. – sede Arequipa; particularmente en el proceso de producción de leche evaporada. Aquí se cuenta con equipos de evaporación de leche de bajo rendimiento que requieren ser mejorados automatizando su sistema

de control -ya que con el que se cuenta es obsoleto- con la finalidad de minimizar costos al invertir solo en la etapa del sistema de control sin necesidad de nuevos equipos de evaporación, ya que se cuenta con recursos para ello.

El evaporador cuenta con tres efectos de evaporación y un sistema de precalentamiento conformado por un tratamiento térmico inicial y una etapa de enfriamiento final.

En el diagrama siguiente tenemos el PID del proceso evaporación propiamente dicho, el control es realizado por medio de controladores aislados que controlan variables aisladas en lazo cerrado dentro del proceso general de evaporación. Se describen las variables a manejar como son temperatura, flujo y nivel.



La evaporación de leche se produce cuando las moléculas reciben suficiente energía para escapar en forma de vapor de soluciones líquidas. Dentro del proceso de la gráfica anterior el producto (celeste) ingresa por cada uno de los efectos a través de bombas centrifugas, la regulación de ingreso de producto a cada uno de los efectos se realiza a través de válvulas proporcionales y como ya se mencionó con un control aislado para cada efecto. La temperatura de evaporación es controlada directamente por una válvula proporcional de vapor (rojo) en la parte superior del primer efecto, la repartición del calor en los demás efectos se realiza a través de los colectores o acumuladores de condensado. La eliminación de agua de un producto líquido por medio de la evaporación es acelerada por calentamiento y por eliminación del aire saturado que se forma sobre la superficie del líquido. Esto se puede conseguir mediante la circulación forzada de aire sobre la superficie del líquido por disminución de la presión mediante la creación de vacío sobre la superficie. El monitoreo de nivel mediante diferenciales de presión se realiza de forma continua para evitar un sobre llenado de los efectos y por lo tanto un colapso en el proceso.

Siendo un sistema de 3 efectos con controles automáticos separados, la armonía del sistema y la capacidad de mantener un trabajo dentro de los parámetros constantes y sin oscilaciones resulta imposible, por lo que se opta por el control automático con PLC para generar un control único con variables enlazadas en un solo sistema.

1.1. Objetivo General.

Diseñar e implementar un sistema de control automático para el evaporador de leche, que permita elevar la calidad y productividad del proceso, mediante la inclusión de un autómata programable, sensores y accesorios electrónicos modernos.

1.2. Objetivos Específicos

- 1.2.1. Estudiar y analizar la bibliografía referente al proceso de evaporación de la leche y a los evaporadores para poder determinar un correcto diseño del control automático a desarrollar.
- 1.2.2. Analizar el funcionamiento del evaporador de la planta de producción de leche evaporada y determinar sus principales características técnicas.
- 1.2.3. Analizar el funcionamiento basado en el trabajo que ejerce la instrumentación dentro del proceso de evaporación de leche con el fin de determinar las características de los equipos e instrumentos necesarios para su aplicación en los lazos de control.
- 1.2.4. Efectuar las pruebas de funcionamiento correspondientes.

1.3. Alcances

Durante los últimos años el campo de la electrónica y de la informática, ha logrado adelantos significativos fundamentalmente en lo tecnológico. Se han desarrollado importantes equipos y dispositivos para el uso industrial en base a los microprocesadores, microcontroladores, autómatas programables, dispositivos de almacenamiento y un inmenso arsenal de software aplicativo como los SCADA. Si por un lado respecto a los equipos en cierto modo podemos tener acceso; en lo referente al proceso real mismo, este no está a nuestro alcance por el hecho que como es lógico no podemos trabajar este mismo por razones obvias y es por ello que lo haremos en condiciones de laboratorio.

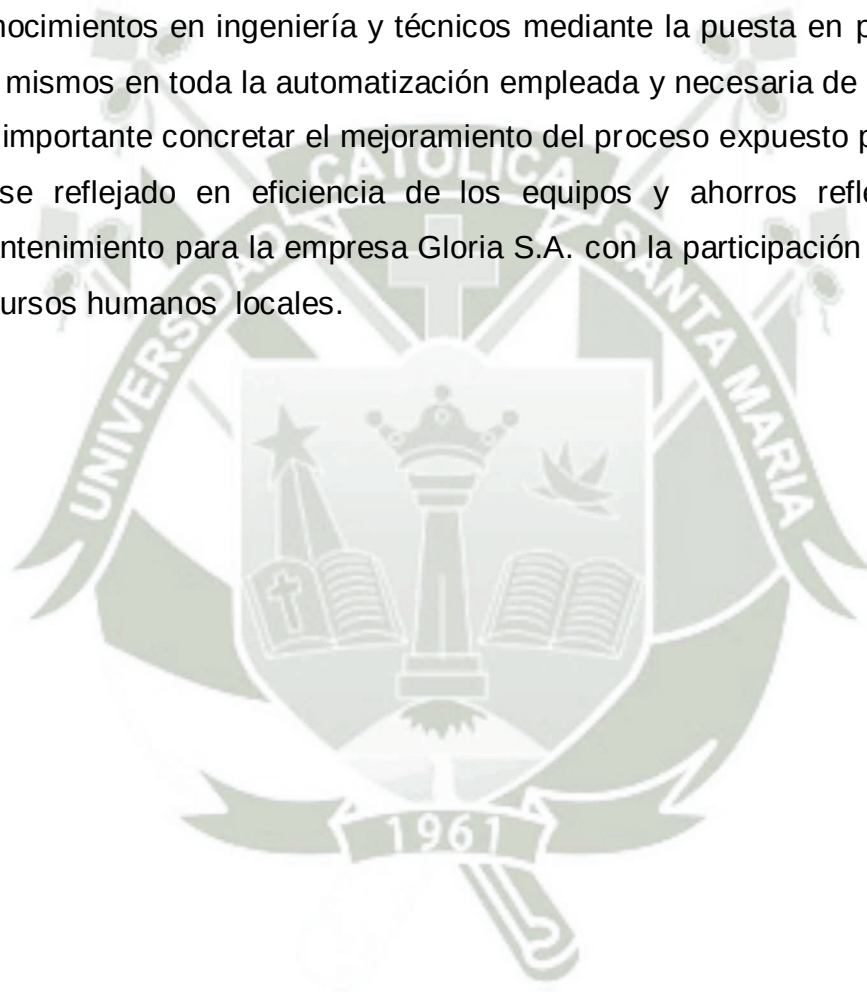
1.4. Limitaciones

El presente trabajo se limita al estudio de control simple y aislado del sistema de control automático de evaporación de la leche en planta de producción de leche evaporada, el cual pretende mediante su modernización obtener mejoras en cuanto a calidad y funcionabilidad.

1.5. Justificación del Estudio

Estimamos que este estudio es necesario y actual, por cuanto está centrado en un tema fundamental referente al mejoramiento del proceso productivo en general, mediante la automatización con participación directa de recursos humanos locales, asimilando e introduciendo nuevas tecnologías.

Estimamos que este estudio es necesario y actual para poder expandir los conocimientos en ingeniería y técnicos mediante la puesta en práctica de los mismos en toda la automatización empleada y necesaria de esta tesis. Es importante concretar el mejoramiento del proceso expuesto para poder verse reflejado en eficiencia de los equipos y ahorros reflejados en mantenimiento para la empresa Gloria S.A. con la participación directa de recursos humanos locales.



CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Evaporadores de Capa Descendente.

Durante los últimos 40 años el evaporador de película descendente ha reemplazado prácticamente al evaporador de recirculación forzada, ver Fig 2. En cuanto a la calidad del producto este tipo de evaporador es preferible, ya que ofrece un tiempo de retención breve. Además se reduce la cantidad de producto en el evaporador y se aumenta la superficie donde se efectúa la evaporación. La Fig. 3 muestra un diagrama de un evaporador de película descendente.

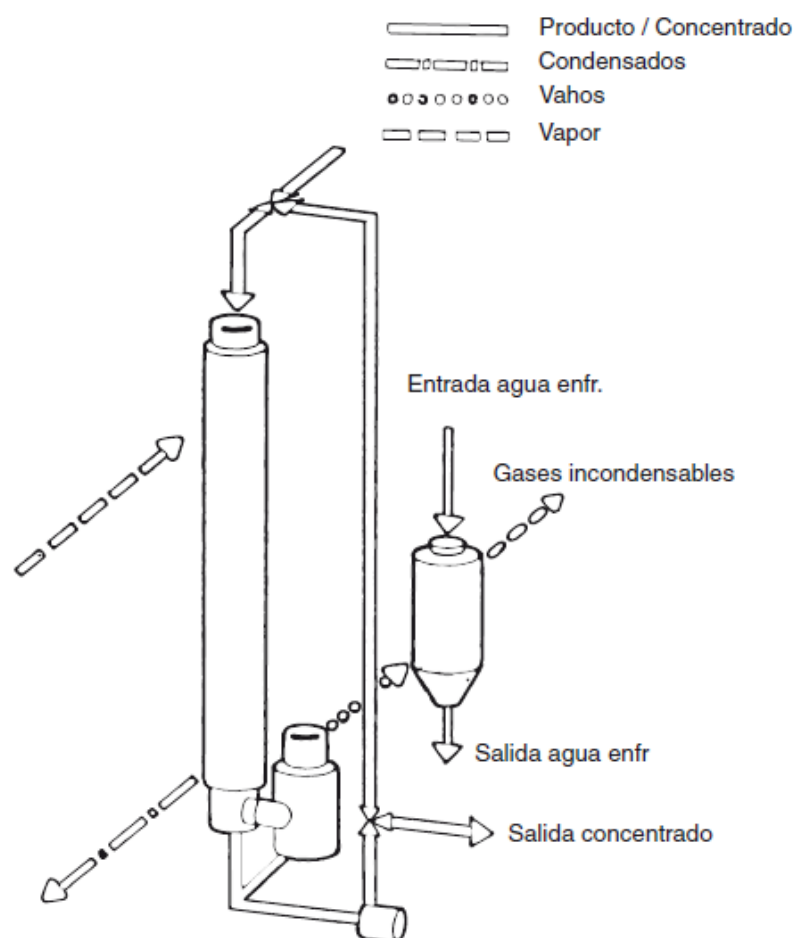


Fig. 2. Evaporador de película descendente de recirculación. [1]

El líquido a ser evaporado se distribuye uniformemente sobre la superficie interior del tubo y fluye hacia abajo formando una película delgada, de la cual la ebullición/evaporación tiene lugar, a razón del calor generado por el vapor. Ver Fig.3.

El vapor se condensa y fluye hacia abajo sobre la superficie exterior del tubo. Un número de tubos están contruidos de lado a lado.

Los extremos de los tubos se fijan a placas y todo el grupo de tubos está encerrado en una camisa, ver Fig.4 El vapor es introducido a través de la camisa, y el espacio entre los tubos forma la sección de calentamiento. El lado interior de los tubos se denomina la sección de ebullición. Juntos

forman el cuerpo de calentamiento (llamada la calandria). El líquido concentrado y los vahos salen de la parte inferior de la calandria, de donde se descarga también la mayoría del líquido concentrado. El resto entra tangencialmente en el separador subsiguiente junto con los vahos. El concentrado separado es descargado (normalmente mediante la misma bomba que descarga la mayoría del concentrado de la calandria), y los vahos salen de la parte superior del separador. El vapor condensado es recogido como condensados en el fondo de la sección de calentamiento y descargado mediante una bomba.

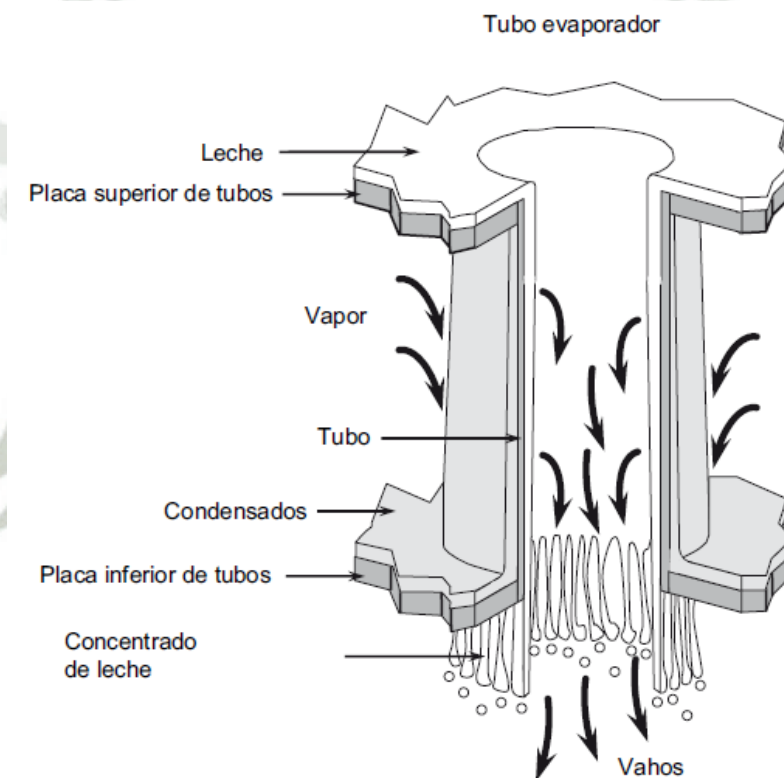


Fig. 3. Evaporación de un tubo de un evaporador de película descendente. [1]

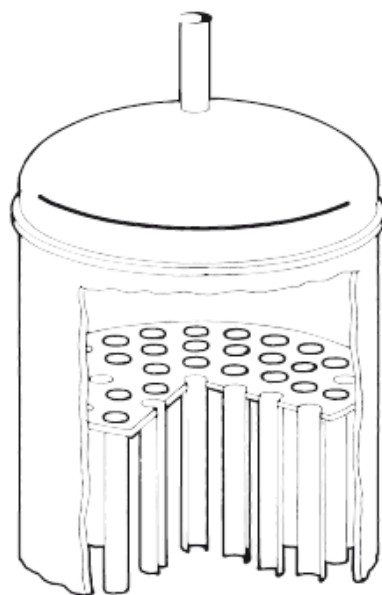


Fig. 4. Calandria del evaporador [1]

Para poder comprender la transferencia de calor y de masa, que forma la base de la evaporación, es preciso definir algunas cantidades específicas.

De una determinada cantidad de líquido (A) una parte es evaporada (B) dejando el concentrado o el producto evaporado (C). Por lo tanto

$$A = B + C$$

La Fig. 5. muestra las cantidades específicas y el correspondiente diagrama de flujo del calor.

La relación de evaporación (e) es una medida para la intensidad de evaporación y puede definirse como la relación entre la cantidad de producto a tratar y el concentrado o también como la relación entre el porcentaje de sólidos en el concentrado y en el producto a tratar.

$$e = \frac{A}{C} = \frac{A - \text{concentrado}}{C - \text{liquido}}$$

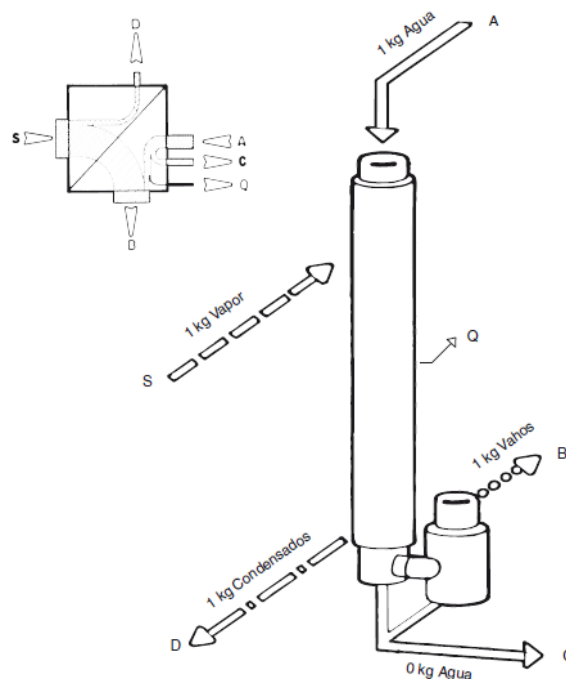


Fig. 5. Evaporador de una etapa. [1]

2.1.1. Definición de distintas cantidades específicas y el correspondiente diagrama de flujo de calor.

Si se conocen las concentraciones o la relación de evaporación es posible calcular las cantidades A, B o C, si se conoce una. Estas ecuaciones pueden ser visualizadas en siguiente tabla.

Tabla 1. Concentraciones de Evaporación [1]

Cantidad conocida	desconocida	Fórmula
Cantidad a tratar A	B	$B = A \times \frac{e-1}{e}$
	C	$C = A \times \frac{1}{e}$
Cantidad evaporada B	A	$A = B \times \frac{e}{e-1}$
	C	$C = B \times \frac{1}{e-1}$
Concentrado C	A	$A = C \times e$
	B	$B = C \times (e-1)$

Donde:

A: alimentación en kg/h

B: evaporación en kg/h

C: concentrado en kg/h

e: relación de evaporación

Debido a su contenido en proteínas la leche es termo-sensible, por lo cual una evaporación (ebullición) a 100°C dará lugar a una desnaturalización de dichas proteínas hasta tal punto, que el producto final será considerado inapto para consumo. Por lo tanto, la sección de ebullición se realiza bajo vacío dando una ebullición/evaporación a una temperatura más baja que la que corresponde a la presión atmosférica normal. Se obtiene el vacío mediante una bomba de vacío antes del arranque del evaporador y se mantiene por medio de una condensación de los vahos con agua de enfriamiento. Para evacuar los gases incondensables de la leche se usa una bomba de vacío o similar.

A 100°C la entalpía de evaporación para agua es de 539 Kcal/kg y a 60°C es de 564 Kcal/kg. Debido a que la leche debe calentarse desde p.ej. 6°C hasta el punto de ebullición, y se requiere como energía, aprox. 20 Kcal/kg, para mantener un vacío correspondiente a un punto de ebullición de 60°C , se obtienen las siguientes cifras de consumo energético, estimando una pérdida de calor del 2%:

Tabla 2. Valores de Consumo Energético [1]

Temperatura de ebullición	°C	100	60
Calentamiento	Kcal/kg	94	54
Evaporación	Kcal/kg	539	564
Vacío	Kcal/kg	-	20
Consumo energético neto	Kcal/kg	633	638
Pérdida de calor, aprox.	Kcal/kg	15	15
Consumo total de energía	Kcal/kg	<u>648</u>	<u>653</u>

Correspondiente a aprox. 1,1 kg de vapor/kg de agua evaporada.

Para simplificar los siguientes ejemplos usaremos 1 kg de vapor/kg de agua evaporada. Los vahos procedentes de la leche evaporada, ver Fig. 4, contienen casi toda la energía aplicada, y por eso es obvio aprovechar estos vahos para evaporar más agua. Esto se realiza añadiendo otra etapa al evaporador. Esta nueva calandria la segunda etapa donde la temperatura de ebullición es más baja, ahora trabaja como condensador para los vahos de la primera etapa, y así se aprovecha la energía en los vahos a medida que se condensan.

Para obtener una diferencia de temperatura en la segunda etapa entre el producto y los vahos procedentes de la primera etapa, se opera la sección de ebullición de la segunda etapa a un vacío superior correspondiente a un temperatura de ebullición más bajo.

Tabla 3. Valores 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	5.200	2,8 m ³ /kg
70	7,2	233	10.000	4,8 m ³ /kg
60	8,3	149	14.000	7,7 m ³ /kg
50	9,1	92	18.000	12,0 m ³ /kg
40	9,6	55	22.000	19,6 m ³ /kg

Se puede añadir una tercera etapa, calentada mediante vahos de la segunda etapa, y así sucesivamente. El límite es el mínimo vacío obtenible lo cual es determinado por la cantidad y temperatura del agua de enfriamiento (normalmente 20-30°C) que condensa los vahos de la última etapa, y así se mantiene el vacío. El uso de agua helada o una expansión directa de freón para bajar la temperatura de ebullición de la última etapa es posible en teoría, pero otros factores, como p.ej. la viscosidad del producto, el volumen de los vahos, y la cristalización de la lactosa, determinan en la práctica el límite alrededor de 45°C.

La Fig. 5 muestra que 1 kg de vapor puede evaporar 2 kg de agua y con una tercera etapa se pueden evaporar 3 kg de agua mediante sólo 1 kg de vapor.

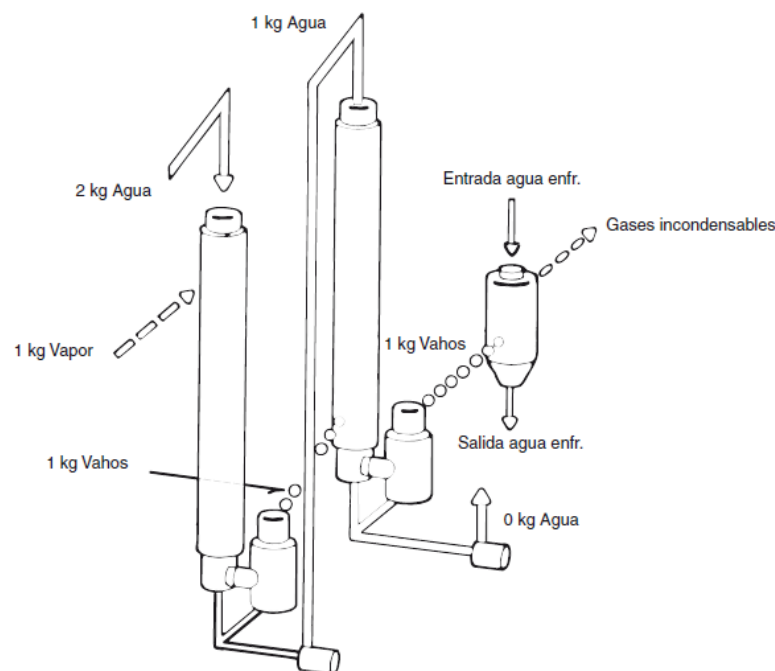


Fig. 6. Los principios de la evaporación de agua en dos etapas. [1]

2.2. Re-compresión Térmica de los Vahos (RTV)

Otro modo de ahorrar energía es utilizar un termo-compresor, el cual aumenta el nivel de temperatura/presión de los vahos, es decir comprime los vahos desde una presión baja a una alta mediante vapor de una presión mayor a la de los vahos. Los termocompresores trabajan a muy altas velocidades de flujo de vapor y no tienen partes móviles. La construcción es sencilla, las dimensiones reducidas y los costos bajos. La Fig. 6 muestra el principio del termo-compresor.

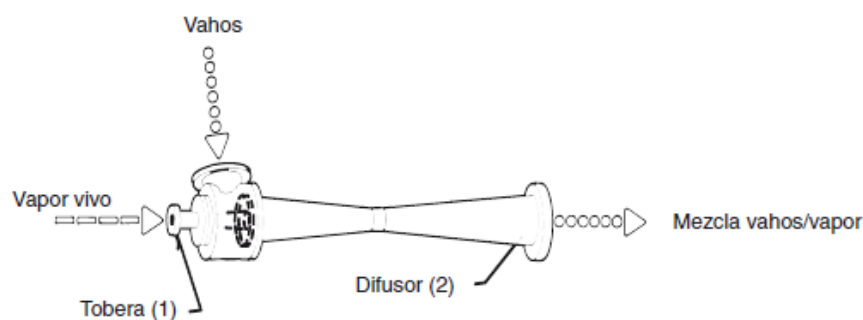


Fig. 7. Termo compresor [1]

En la tobera de vapor vivo (1) la presión del vapor de entrada es convertida en velocidad y se crea un chorro tal que extrae parte de los vahos desde el separador del evaporador. En el difusor (2) se forma un flujo rápido de una mezcla de vapor vivo y vahos, y la velocidad de este flujo es convertida en presión (aumento de temperatura) mediante una retardación. Luego la mezcla puede utilizarse como medio de calentamiento para el evaporador. La Fig. 7 muestra un evaporador de dos etapas con compresión térmica, y la Fig. 8 el correspondiente diagrama del flujo de calor.

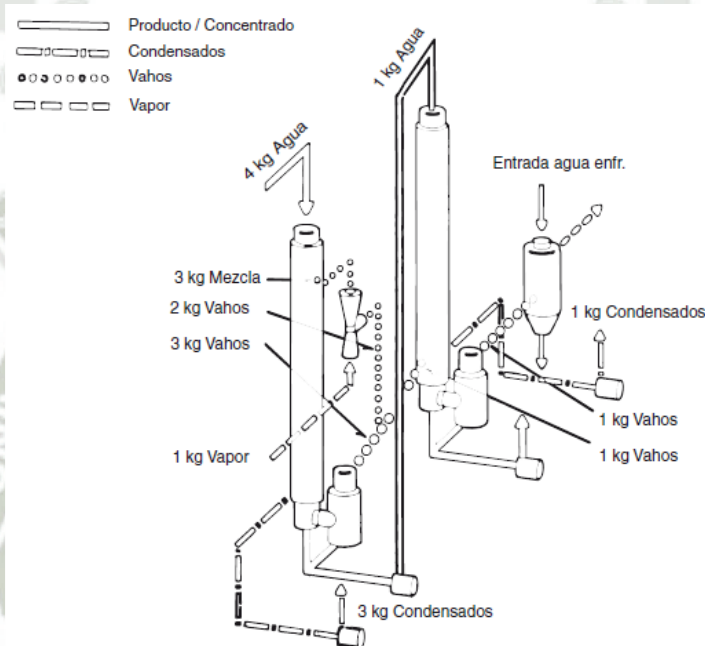


Fig. 8. Evaporador de dos etapas con compresión térmica. [1]

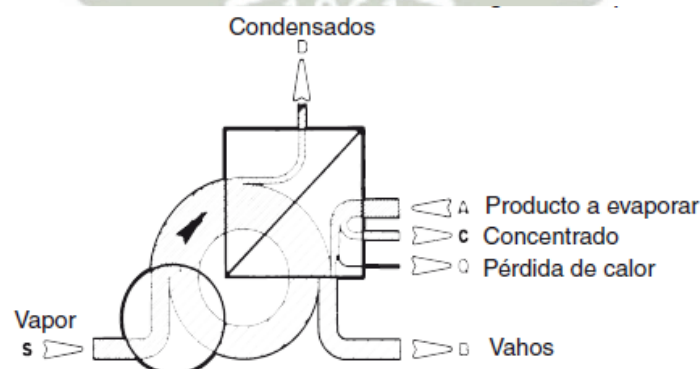


Fig. 9. Diagrama de flujo de calor. [1]

La mejor eficiencia en el termo-compresor, es decir el mejor grado de aspiración, genera una buena economía y se obtiene cuando la diferencia de temperatura (presión) entre la sección de ebullición y la de calentamiento es baja.

Los termo-compresores deben ser ajustados a las condiciones de trabajo. Pero dichas condiciones pueden variar, por ejemplo a causa de un aumento de la resistencia de calor de las superficies de calentamiento durante la operación, debido a depósitos en los tubos de calentamiento. Esto dará como resultado una baja considerable del grado de aspiración. En evaporadores que tienen que trabajar con distintas capacidades se instalan varios compresores con diferentes características. Además, un termo-compresor, construido para una mayor presión de vapor vivo, puede extraer más vahos del separador que uno construido para presiones bajas. Para simplificar utilizaremos a continuación una eficiencia de 1:2, aunque los termo-compresores de diseño nuevo pueden operar con una eficiencia de 1:3, bajo ciertas condiciones.

Ahora bien, mediante la instalación de un termo-compresor en un evaporador de dos etapas, por medio de 1 kg de vapor vivo se evaporan 4 kgs de agua, es decir, el ahorro de vapor correspondería al ahorro obtenido mediante dos etapas adicionales en el evaporador de multi-etapas. La división de una dada Δt total entre la primera y la última etapa en evaporadores de multi-etapas requiere una superficie enorme de calentamiento y, por consiguiente, una instalación costosa.

Es posible reducir la superficie total de calentamiento aumentando la Δt mediante un aumento de la temperatura en la sección de calentamiento de la primera etapa, dando lugar a una temperatura de ebullición más alta. Sin embargo, esto da lugar a un ensuciamiento (depósitos micro-delgados de proteínas de leche en los tubos reduciendo el factor K) especialmente si la leche tiene una acidez alta. A altas temperaturas la cristalización de Ca-fosfatos también provocará depósitos.

Por este motivo, no es recomendable utilizar temperaturas de ebullición superiores a 68-70°C en la primera etapa (dependiendo del producto y la calidad de la leche), si el fin es un período continuo de producción de 20 horas.

La superficie de cada etapa individual del evaporador es calculada aplicando la siguiente fórmula:

$$S = \frac{B \cdot h''}{K \cdot \Delta t}$$

Donde:

- S: superficie de calentamiento m²
- B: vaho de agua kg/h
- h'': calor específico Kcal/kg (entalpía de condensación)
- K: coeficiente de transferencia térmica Kcal x m⁻² x h⁻¹ x °C⁻¹
- Δt: diferencia de temperatura o fuerza motriz °C
(entre medio de calentamiento y líquido de ebullición)

El factor más crítico en conexión con la construcción de un evaporador es el factor K siendo una función de las propiedades del producto y el nivel de temperatura. Está influenciado por:

- Temperatura del evaporador
- Calor específico
- Densidad
- Presión de ebullición
- Elevación del punto de ebullición
- Conductividad térmica
- Viscosidad
- Tensión de superficie

Otros factores a considerar:

Sensibilidad térmica del producto

Características químicas

Se observa que el factor K difiere de un producto a otro, especialmente debido a la elevación del punto de ebullición, que es una función de la concentración de moléculas y así está influenciado por la composición del producto y el contenido en sólidos. Con un contenido en sólidos del 9%, como en la leche descremada, la elevación del punto de ebullición es inferior a 1°C, mientras que con un contenido en sólidos de 48-50% es varios grados. Una conclusión para establecer este factor se obtiene sólo mediante extensos ensayos de laboratorio.

La capacidad (C) de un evaporador es

$$C = K \cdot S \cdot \Delta t$$

Así la capacidad de un evaporador puede aumentarse mediante una mayor superficie o una temperatura de ebullición más alta en el primer efecto. No se recomienda aplicar temperaturas superiores a 66-68°C, según discutido en lo anterior.

El Δt total (normalmente desde 66°C a 45°C = 21°C) se divide igualmente entre las etapas. Esto significa que en un evaporador de tres etapas cada etapa tendrá un alto Δt correspondiente a una superficie bastante reducida y bajos costos de inversión. Es evidente, pues, que mediante un aumento del número de etapas, reduciendo el consumo de vapor, el Δt disponible se reduce más en cada etapa. Esto requiere una mayor superficie de calentamiento y los costos de inversión aumentarán.

El termo-compresor puede incorporarse entre la primera y la segunda etapa (compresión mono-térmica), o bien entre la primera y la tercera (compresión bi-térmica), o entre la primera y cuarta etapa (compresión tri-térmica). La influencia en el ahorro de vapor y en los costos de inversión es

grande. Estudiando un evaporador de 7 etapas con compresión mono-térmica (ver la Fig. 9), se comprueba que es posible evaporar 9 kg de agua mediante sólo 1 kg de vapor. Para compresión tri-térmica se coloca el termo-compresor, por ejemplo, entre la primera y la cuarta etapa (ver la Fig. 10). Así es posible evaporar 13 kg de agua usando sólo 1 kg de vapor, ya que se aprovechan todos los vahos de la primera etapa para calentar la segunda etapa y los vahos de ésta son utilizados en la tercera etapa, de donde una parte es comprimida en el termocompresor.

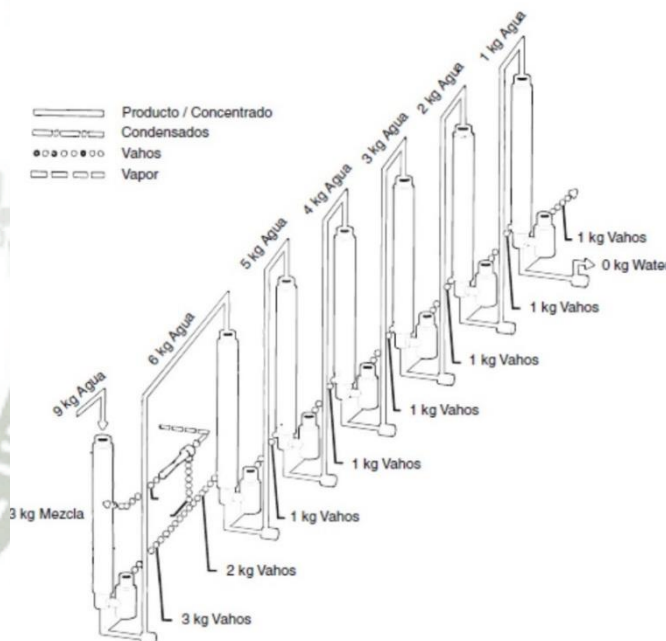


Fig. 10. Compresión mono-térmica. Evaporación RTV de 7 efectos [1]

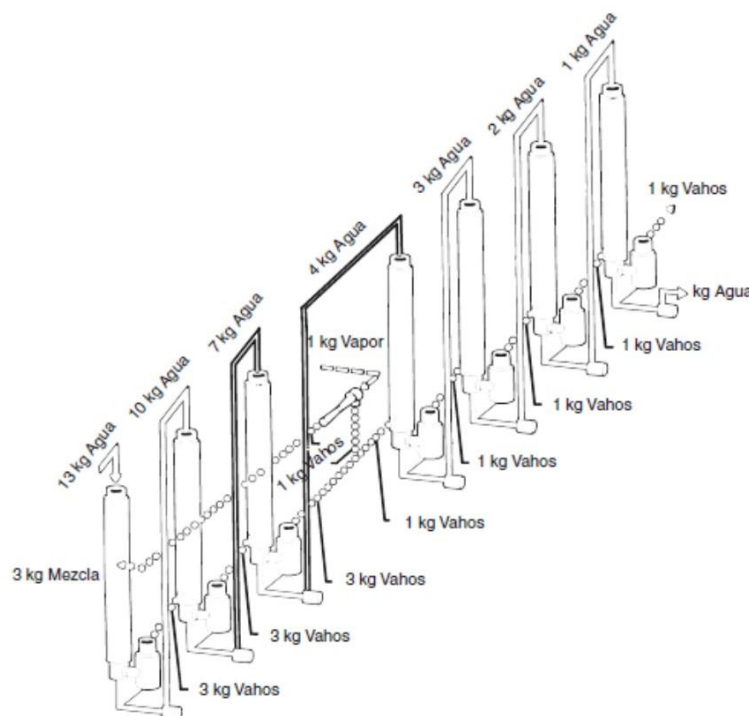


Fig. 11. Compresión politérmica. Evaporación RTV de 7 efectos [1]

Si el termo-compresor significa un aumento de la temperatura de los vahos en 9°C habrá un Δt de 3°C para cada etapa en un evaporador tri-térmico. Para poder mantener una evaporación de 9 kg en las primeras tres etapas se necesita una superficie mayor en relación al ejemplo con compresión mono-térmica.

Conocidos la longitud y el diámetro de los tubos será posible calcular el número de tubos de acuerdo con la fórmula antes mencionada.

Sin embargo, una desventaja sustancial en evaporadores de multi-efectos es el largo tiempo de residencia, durante el cual se expone el producto a calor. Siendo también a una temperatura baja, tendrá un impacto negativo en la viscosidad del concentrado.

2.3. Separadores con Entrada Tangencial de los Vahos

Los vahos generados de la evaporación se usan como medio de calentamiento en la "próxima" calandria, por lo que es necesario separar cualquier producto, para evitar una contaminación de los condensados dando lugar a pérdidas.

La mayoría del concentrado se descarga del fondo de la calandria debajo del haz de tubos. Debido a la alta velocidad de los vahos parte del concentrado queda en los vahos como pequeñas gotitas. La separación tiene lugar en un separador con entrada tangencial de los vahos, ver Fig. 11, conectada a la calandria debajo del tubo.

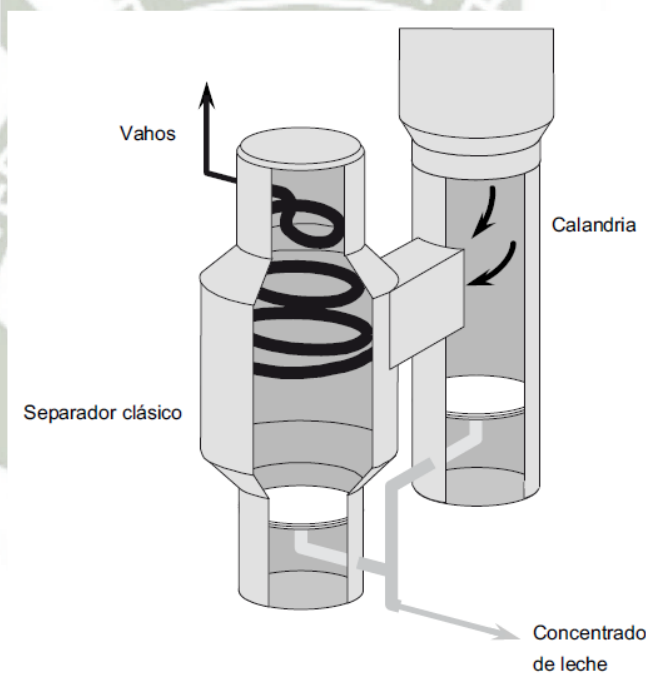


Fig. 12. Separador con entrada tangencial. [1]

2.4. Equipo de Condensación

Todos los evaporadores en la industria láctea operan con vacío, y por eso están equipados con una instalación de condensación y evacuación de aire para condensar los vahos que ya no pueden ser utilizados y para crear y mantener el vacío en la planta.

La cantidad de calor a descargar del condensador depende de la cantidad de vahos residuales de la última etapa y la temperatura de los mismos.

Con el fin de ahorrar agua de enfriamiento y energía, la leche a evaporar (a una temperatura de 5-10°C) es utilizada para pre-enfriar y condensar los vahos al mismo tiempo que se está precalentando la leche. Sin embargo, el grado final de la condensación es determinada por la cantidad y temperatura del agua de enfriamiento. Como siempre habrá aire y gases incondensables en la leche a ser evaporada, y posiblemente pequeñas fugas en la planta, es necesario tener equipos para aspirar este aire/gas para mantener el vacío. Los mismos equipos son usados para crear el vacío durante el arranque.

2.5. Sistemas de Control de Bombas de Vacío

El control de vacío convencional se lleva a cabo por medio de una bomba de velocidad constante dimensionada para el caudal más grande posible y permitiendo que el aire sangra en el sistema a través de un sistema de regulación de presión.

Como se ha visto, el vacío en la última etapa del evaporador es una función de la cantidad de agua de enfriamiento y la temperatura. El vacío en la primera y las etapas intermedias es creado por el grado de evaporación en la calandria siguiente actuando como un condensador para los vahos de la etapa anterior. Cualquier cambio en el grado de evaporación en una etapa, debido p.ej. a ensuciamiento (menor factor K) significaría una menor condensación de los vahos. Esto lleva consigo un aumento de la temperatura de ebullición en la etapa previa, el Δt se reduce y asimismo la capacidad total de evaporación. Cada etapa es conectada al condensador para asegurar la desaireación de aire no condensable y gas.

Para la creación y mantenimiento (debido a los gases no condensables y las fugas) del vacío en el evaporador se usan dos tipos de bombas:

- Bombas de vacío (la que utilizamos)
- Bombas eyectoras de vapor a vacío

2.6. Variadores de Frecuencias Ajustable

Los equipos de estado sólido tienen características de funcionamiento diferentes a las de los equipos electromecánicos. El documento *Safety Guidelines for the Application, Installation and Maintenance of Solid State Controls*, describe algunas de las diferencias más importantes entre los equipos de estado sólido y los dispositivos electromecánicos de lógica cableada. Debido a esta diferencia y a la amplia variedad de usos de los equipos de estado sólido, todas las personas responsables de la aplicación de estos equipos deberán verificar que el mismo satisfaga los requisitos para la aplicación específica deseada.

2.7. Automatización de Procesos Industriales con Controlador Lógico Programable PLC.

La automatización representa la optimización de procesos, reducción de costos e incremento de la productividad. Tanto los equipos convencionales como los modernos sufren cambios sustanciales, permitiendo excelentes ventajas. Para distintos problemas de automatización, se menciona una variedad de soluciones, unas más sofisticadas que otras, cuya aplicación depende no sólo del conocimiento de la técnica, sino también del personal que tendrá la responsabilidad de su ejecución.

Por otro lado, muchos sistemas están conformados por equipos de diferentes fabricantes y funcionan en distintos niveles de automatización; además, a menudo se encuentran distanciados entre sí, pero se desea que trabajen en forma coordinada para un resultado satisfactorio del proceso. Es así que nos apoyamos en las comunicaciones para su integración.

CAPÍTULO III

INGENIERÍA DE DETALLE

3. INGENIERÍA DE DETALLE

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

3.1. Descripción de los Requerimientos a Controlar

Con el objetivo de mejorar la producción de leche evaporada es necesario controlar el principal lazo la alimentación del vapor (caudal y temperatura) en el primer efecto del evaporador, ya que el control de la primera etapa determina la eficiencia y balance del sistema. El vapor controla la temperatura de evaporación en la calandria. El sistema consta de una tubería superior que alimenta el vapor de agua al primer efecto del evaporador. En el detalle de la tubería de vapor se observa una válvula proporcional y un sensor de temperatura (TT200), que forman parte del lazo de control y el sistema de control es el PLC.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la temperatura de evaporación de la leche depende del vacío generado dentro del evaporador, en la Tabla 5 se muestra la correspondencia de la temperatura de ebullición con respecto a la presión de vacío, si se observa en 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 puede notar que a menor presión menor temperatura de ebullición, y por tanto es necesario aumentar el vacío. En otras palabras para aumentar el vacío es necesario reducir la presión, con ello el agua presente en la leche, se evapora a una temperatura menor.

Tabla 4. 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 m³/kg
85	4,5	434	5200	2,8 m³/kg
70	7,2	233	10000	4,8 m³/kg
60	8,3	149	14000	7,7 m³/kg
50	9,1	92	18000	12,0 m³/kg
40	9,6	55	22000	19,6 m³/kg

En el caso de Gloria S.A. se requiere que dicha temperatura no sea superior a los 70° C 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 de Equipos y Software a Utilizar para el Control "Hardware".

3.2.1. Arquitectura de Red

En la industria requiere el control de múltiples sensores y actuadores para lograr una producción más eficiente, por lo que se necesita un sistema acorde a la planta, donde muchas de sus etapas se encuentran descentralizadas, haciendo que esto sea similar a un sistema de control distribuido.

Nuestro sistema se incorpora a una red la cual emplea.

- Una PC donde se encuentra el SCADA Intouch de Wonderware
- Un PLC CompactLogix L32E

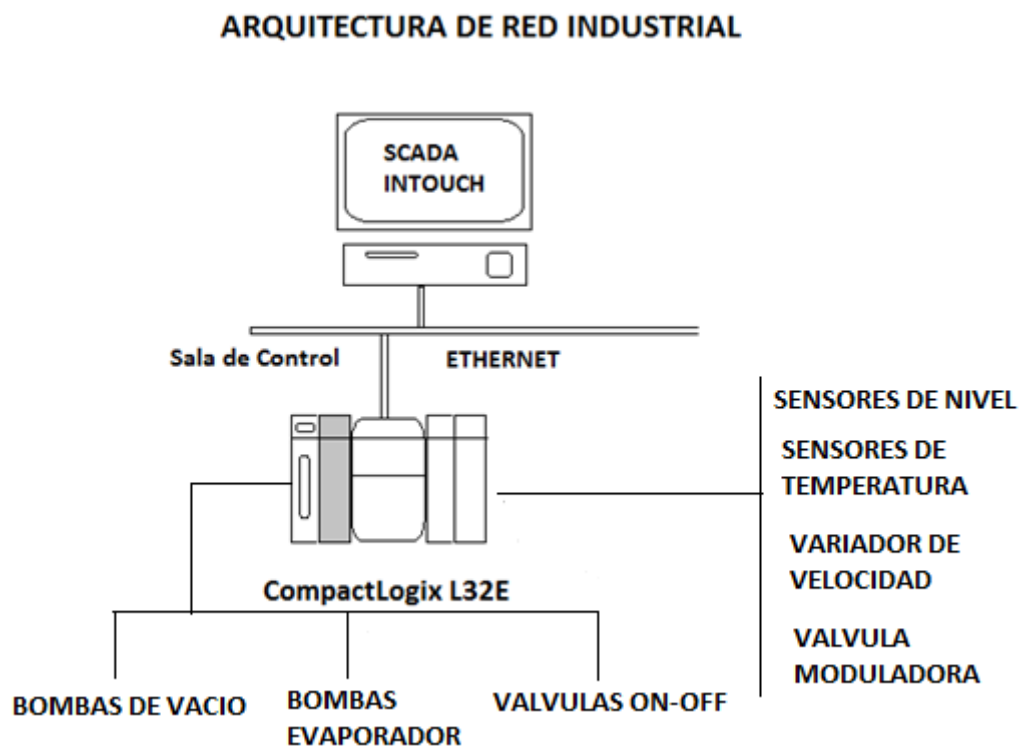


Fig. 13. Arquitectura del Sistema

Tabla 5. Descripción de las variables del proceso

DISTRIBUCIÓN SEÑALES DEL EVAPORADOR					
EQUIPO	MARCA	PLC ALLEN BRADLEY LE 32E			
		DI16	DO8	AO2	AI2
Bomba Efecto # 1	FRISTAM			%Vel1	
Bomba Efecto # 2	FRISTAM			%Vel2	
Bomba Efecto # 3	FRISTAM			%Vel3	
Bomba Vacio # 1	ABB	%I0.0	%O0.0		
Bomba Vacio # 2	ABB	%I0.1	%O0.1		
Flujometro 1	(E+H)				%Flu1
Flujometro 2	(E+H)				%Flu2
Flujometro 3	(E+H)				%Flu3
Sensores de Nivel 1	(E+H)				%Nivel 1
Sensores de Nivel 2	(E+H)				%Nivel 2
Sensores de Nivel 3	(E+H)				%Nivel 3
Válvulas Moduladoras 1	SPIRAX SARCO			%Mod1	
Válvulas Moduladoras 2	SPIRAX SARCO			%Mod2	
Válvula Pneumática ON OFF 1	ALFA LAVAL		%Festo 1		
Válvula Pneumática ON OFF 2	ALFA LAVAL		%Festo 2		
Válvula Pneumática ON OFF 3	ALFA LAVAL		%Festo 3		
Sensores de temperatura 1	RTD (BURNS)				%Temp 1
Sensores de temperatura 2	RTD (BURNS)				%Temp 2
Sensores de temperatura 3	RTD (BURNS)				%Temp 3

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 registrar magnitud física y llevarla a él sensor que se encarga de convertir esta magnitud física en una señal eléctrica de tensión o corriente y 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 este 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), 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. Ecuación 1

$$K_T = \frac{\text{Rango de salida}}{\text{Rango de Entrada}} \quad [1]$$

La respuesta dinámica es suficientemente rápida en la mayoría de los sensores-transmisores. Así, la respuesta dinámica puede ser representado por un sistema de ecuaciones 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 2.

$$G(s) = \frac{K_T}{\tau \cdot s + 1} \quad [2]$$

Dónde:

K_T : Ganancia del transmisor.

τ : Constante del tiempo del transmisor.

3.2.3. Sensor de Temperatura (RTD BURNS)

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 a utilizar es PT100, de la marca BURNS, este equipo se encarga de medir la temperatura un rango de trabajo, según su hoja de datos va desde los 0°C a 150°C, utilizaremos adicionalmente un transmisor de temperatura de la marca Endress Hauser TMT 182 en un rango de corriente de 4-20mA.

Tabla 6. Rangos de temperatura para diferentes RTD Burns. [6]

Resistance vs. Temperature										
$R_0 = 100 \quad \Omega$		$\alpha = 0.003851 \Omega / \Omega / ^\circ C$								
Degrees C		ITS-90								
$^{\circ}C$	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-200	18.52									
-190	22.83	22.40	21.97	21.54	21.11	20.68	20.25	19.82	19.38	18.95
-180	27.10	26.67	26.24	25.82	25.39	24.97	24.54	24.11	23.68	23.25
-170	31.34	30.91	30.49	30.07	29.64	29.22	28.80	28.37	27.95	27.52
-160	35.54	35.12	34.70	34.28	33.86	33.44	33.02	32.60	32.18	31.76
-150	39.72	39.31	38.89	38.47	38.05	37.64	37.22	36.80	36.38	35.96
-140	43.88	43.46	43.05	42.63	42.22	41.80	41.39	40.97	40.56	40.14
-130	48.00	47.59	47.18	46.77	46.36	45.94	45.53	45.12	44.70	44.29
-120	52.11	51.70	51.29	50.88	50.47	50.06	49.65	49.24	48.83	48.42
-110	56.19	55.79	55.38	54.97	54.56	54.15	53.75	53.34	52.93	52.52
-100	60.26	59.85	59.44	59.04	58.63	58.23	57.82	57.41	57.01	56.60
-90	64.30	63.90	63.49	63.09	62.68	62.28	61.88	61.47	61.07	60.66
-80	68.33	67.92	67.52	67.12	66.72	66.31	65.91	65.51	65.11	64.70
-70	72.33	71.93	71.53	71.13	70.73	70.33	69.93	69.53	69.13	68.73
-60	76.33	75.93	75.53	75.13	74.73	74.33	73.93	73.53	73.13	72.73
-50	80.31	79.91	79.51	79.11	78.72	78.32	77.92	77.52	77.12	76.73
-40	84.27	83.87	83.48	83.08	82.69	82.29	81.89	81.50	81.10	80.70
-30	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67
-20	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62
-10	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55
0	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48
$^{\circ}C$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52
80	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33
90	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13
100	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91
110	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69
120	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46
130	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21
140	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95
150	157.33	157.70	158.07	158.45	158.82	159.19	159.56	159.94	160.31	160.68

Para lograr una correcta lectura de la RTD existen en el mercado diversos módulos de conversión, en este caso usaremos el transmisor endress+Hauser TMT 182, que nos ayudara a convertir la variación de la 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 más robusta ante el ruido que una señal de tensión.



Fig. 14. Sensor de Temperatura RTD Burns [7]

3.2.4. Sensor de Presión (Diferencial de Presión FMD78 Endress + Hauser)



Fig. 15. Sensor de Presion Diferencial [11]

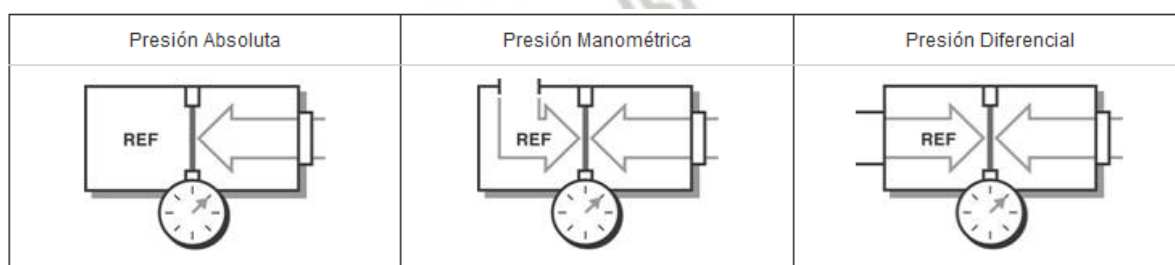


Fig 16. Tipos de presion [17]

La presión diferencial es muy similar a la presión manométrica, sin embargo, la referencia es otro punto de presión en el sistema más que la presión ambiental. Puede usar este método para mantener una presión relativa entre dos contenedores como tanque de compresor y línea de transmisión asociada.

Los transductores basados en puente wheatstone o tensión son una manera común de medir desplazamiento. Los sensores que utilizan este tipo de diseño cumplen con una variedad de requerimientos como precisión, tamaño, costo y robustez. Los sensores de puente son usados para aplicaciones de alta y baja presión y pueden medir presión absoluta, manométrica y diferencial. Los sensores basados en puente usan una galga extensiométrica para detectar la deformidad de un diafragma sometido a la presión aplicada.

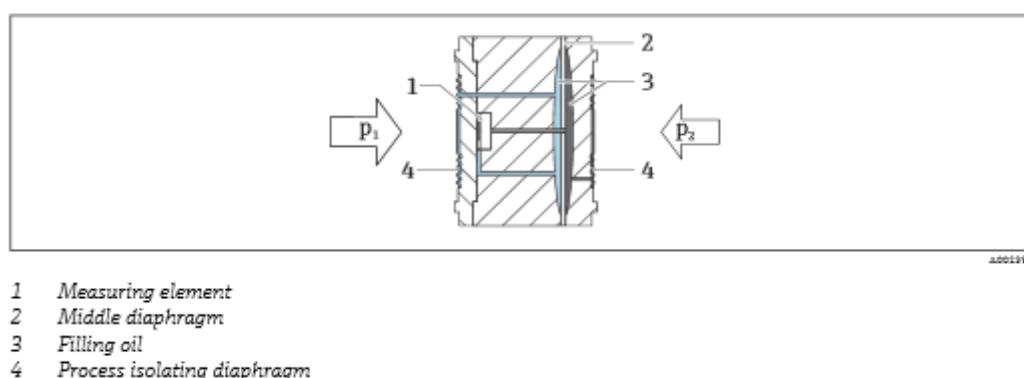


Fig. 17. Proceso de presión Diferencial [17]

El proceso de aislamiento de los diafragmas como se ve en la gráfica son desviados en ambos lados por la acción de ambas presiones. Un llenado de aceite transfiere la presión a un puente de resistencias (tecnología de semiconductores). El cambio de resistencia en el puente se genera en la tensión de salida, que depende de la presión diferencial, se mide y es procesada.

Ventajas:

- Presión de funcionamiento estándar: 160 bar y 420 bar
- Alta estabilidad a largo plazo
- Muy alta resistencia de sobrecarga en un solo lado
- Emite una señal de 4-20mA para el sistema de control

Characteristics	Value	Description
Approval:	A	Non-hazardous area
Output; Operating:	B	4-20mA HART; inside + LCD
Housing; Cover Sealing; Cable Entry:	L	T15 Alu IP66/67 NEMA6P; EPDM; NPT1/2
		thread, T15 = top cover
Nominal Range; Cell Material; PN:	7H	3bar/300kPa/45psi; 316L; 160bar/
		16MPa/2400psi
Calibration; Unit:	1	Nominal range; mbar/bar
Membrane Material:	1	316L
Process Connection:	MT	DIN11851 DN80 PN25 slotted-nut, 316L,
		EHEDG, 3A
Fill Fluid:	1	10,00 m capillary, silicone oil
Additional Option 1:	A	Not selected
Additional Option 2:	U	Mounting bracket, wall/pipe,
		316L, heavy duty design

Fig. 18. Características del sensor diferencial de presión [11]

3.2.5. 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.

Elegimos una válvula moduladora de la marca SPIRAX SARCO LEA31.

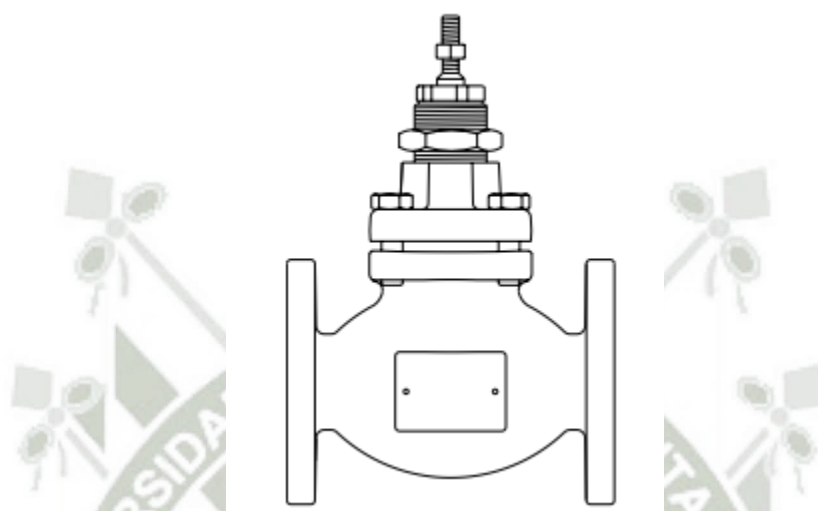


Fig. 19. SPIRAX SARCO LEA31 [8]

Debido al requerimiento importante de tener una mayor estabilidad en el control del diafragma de la válvula, es que elegimos el posicionador neumático TZIDC – v18345, que mediante el proceso de calibración de posición nos ayuda a controlar en un porcentaje más exacto la apertura de la válvula proporcional.

El posicionador inteligente puede alimentarse con una señal de entrada de 4-20 mA o con una alimentación independiente para proporcionar un control de precisión de válvulas con actuadores lineales. La precisión del control se mantiene gracias a la realimentación de la posición de la válvula que automáticamente hace variar la presión de salida neumática para reducir los efectos de la fricción del vástago y las fuerzas del flujo y así mantener la posición deseada de la válvula. La indicación de la posición de la válvula la proporciona un indicador de carrera giratorio y

la pantalla digital muestra de forma continua el porcentaje de carrera. La realimentación del posicionamiento se consigue por interruptores sin contactos de efecto Hall. La neumática está basada en tecnología piezoválvula. Por tanto se garantiza un posicionamiento de alta resolución, fiabilidad e insensible a las vibraciones.



Fig. 20. Posicionador de valvula TZIDC [9]

3.2.6. Flujómetro Magnético

Endress Hauser 50h50-1F0A1AB0AAAD

Mide el flujo de la Salida de producto pasteurizado, Es un tipo de instrumento de medición de alta precisión y desempeño confiable. A través de mejoramientos técnicos continuos, se ha mejorado la tecnología excitación, tecnología de recubrimiento y la tecnología inteligente. Este tipo de medidores de flujo son, especialmente, apropiados para la medición del flujo volumétrico de electricidad en medios conductivos, como ácidos, alcalinos, pulpa etc.

Characteristics	Value	Description
Process Connection:	1	Tri-Clamp, 316L/1.4404
Seal:	F	Aseptic shape, EPDM
Electrodes:	0	1.4435/316L
Calibration:	A	0.5%
Additional Test, certificate:	1	w/o
Approval:	A	Non-hazardous area
Housing:	B	Compact stainless, IP67 NEMA4X
Cable, Remote Version:	0	Not used
Cable Entry:	A	Gland M20 (EEx d > thread M20)
Power Supply; Display:	A	85-260VAC, WEA, 2-line + push buttons, WEA= language DE+EN+FR+IT+ES+PT+NL
Adjustment; Software Feature:	A	Factory setup; basic version
Output, Input:	D	4-20mA SIL HART + freq.+ status+stat.In

Fig 21. Características Flujómetro Magnético [19]

3.2.7. Bomba de Leche Fristam



Fig. 22. Bomba FRISTAM [13]

Los motor–bomba de los efectos del evaporador son bombas centrífugas de marca FRISTAM modelo FPX de calidad en acero inoxidable para mantener la inocuidad del producto. Estas bombas nos ayudan a mantener un flujo de 20 000 kg /h con la potencia del motor de 7.5 HP con 3450 RPMs.

La serie FPX es la bomba ideal para la mayoría de las aplicaciones convencionales tal como la evaporación. El valor superior se obtiene de su estilo de montaje y del uso de un solo sello interno.

La estructura, la tapa y el impulsor de la bomba FPX están hechos con acero inoxidable 316L fundido y forjado, a fin de obtener mayor masa. Otros fabricantes de bombas centrífugas utilizan acero estampado o prensado, más ligero. Gracias a su sólida construcción, la bomba FPX es más resistente al impacto hidráulico y a la cavitación que pueden arruinar una bomba.

3.2.8. Variador de Velocidad Power Flex

Para el arranque de las bombas sin problemas utilizamos variadores Power Flex 70 de la marca Allen bradley



Fig. 23. Variador de velocidad Power Flex [12]

3.2.9. PLC (Compactlogix L32E) Allen Bradley

En la implementación de este proyecto se trabajara con hardware de Allen Bradley CompactLogix 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 y control de actuadores como válvulas y variadores de bombas.



Fig. 24. PLC CompactLogix [18]

3.2.10. Software RSLOGIX 5000

Mediante un lenguaje lógico el programador podrá comunicarse con el PLC y así dotarlo de un programa que controle las actividades que debe realizar. Dependiendo del lenguaje de programación, es posible la realización del programa con distintos grados de dificultad.

Los métodos de programación más utilizados para el PLC son:

- Diagrama escalera (Ladder).
- Bloques funcionales.
- Lista de instrucciones.
- Lenguaje estructurado.
- Lenguaje secuencial (GRAFCET).

El software RSLOGIX 5000, es un entorno de desarrollo en el que se

integran las herramientas de programación necesarias para implementar diversas aplicaciones con los controladores de la línea Allen Bradley.

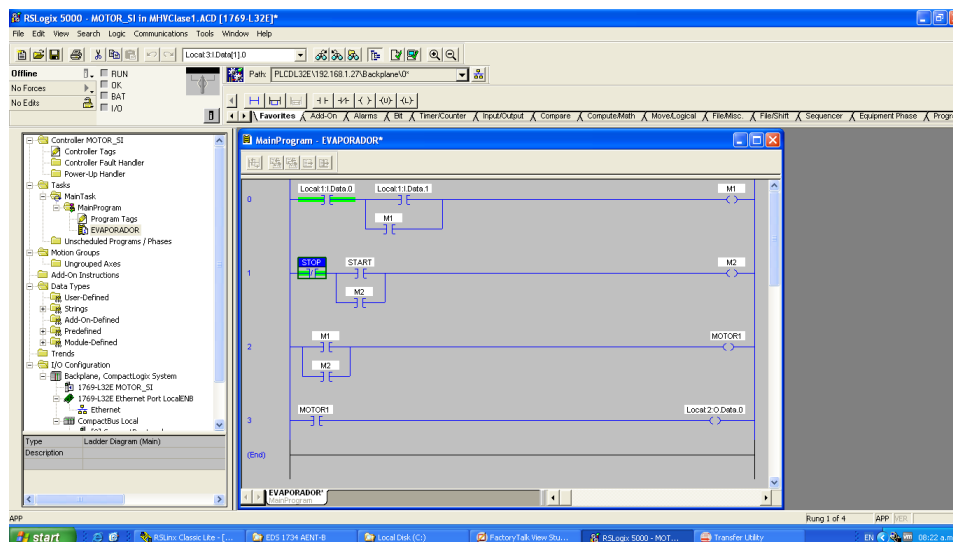


Fig. 25. RsLogix 5000

El PLC es un CompactLogix L32E.

Como características más destacadas decir que tiene 750 kb de memoria de usuario, una ranura para compact flash, un puerto de comunicaciones serie y un puerto Ethernet.

Como el cliente para el que está destinado el PLC tiene estandarizadas versiones de software antiguas, voy a utilizar una máquina virtual con Windows xp sp3 donde voy a instalar todos los programas: RSLogix 5000 (programación de PLC), RS View ME(programación de HMI), RSNetWorx (configuración de redes) y RSLinx (gestión de comunicaciones).

3.2.11. Scada Intouch

El software InTouch ofrece funciones de visualización gráfica que llevan sus capacidades de gestión de operaciones, control y optimización a un nivel completamente nuevo. Aquello que ahora se conoce en la industria

como HMI (Human Machine Interface) comenzó hace más de veinte años con el software InTouch. Ningún otro HMI en el mercado puede compararse al software InTouch en términos de innovación, integridad de arquitectura, conectividad e integración de dispositivos, ruta de migración de versiones de software sin interrupciones y facilidad de uso.

Esto se traduce en sistemas basados en estándares que permiten incrementar al máximo la productividad, optimizar la efectividad del usuario, mejorar la calidad y reducir los costos operacionales, de desarrollo y de mantenimiento.

Beneficios

Facilidad de uso que le permite a desarrolladores y operarios ser más productivos de manera simple y rápida.

Gran integración de dispositivos y conectividad a prácticamente todos los dispositivos y sistemas.

Sus capacidades de representación gráfica y la interacción con sus operaciones permiten entregar la información correcta a las personas correctas en el momento correcto.

Migración de versiones de software sin interrupción, lo que significa que la inversión en sus aplicaciones HMI está protegida.

Capacidades

Gráficos de resolución independiente y símbolos inteligentes que visualmente dan vida a su instalación directamente en la pantalla de su computadora.

Sofisticado sistema de scripting para extender y personalizar aplicaciones en función de sus necesidades específicas.

Alarmas distribuidas en tiempo real con visualización histórica para su análisis.

Graficación de tendencias históricas integradas y en tiempo real.

Integración con controles Microsoft ActiveX y controles .NET.

Librería extensible con más de 500 de objetos y gráficos prediseñados, “inteligentes” y personalizables.

Con el software SMC posible acoplar las variables de I/O del al software Intouch.

Esta herramienta es similar al OPC y define el estándar para comunicar datos en tiempo real de la planta a los dispositivos de control e interfaces HMI (Hombre-Máquina).

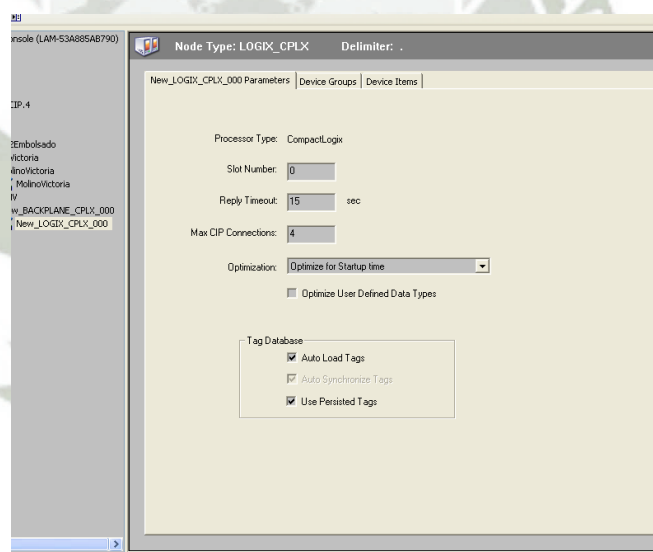


Fig. 26. Configuración de enlace PLC –Intouch

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

4. IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Con base en la información que se recopiló se procedió a realizar un correcto análisis de la mejor forma de implementar el control del lazo en el sistema de evaporación, para ello se separó la implementación en las siguientes etapas:

a) Recolección de información acerca del proceso de evaporación

En este se llevó a cabo, la recolección de información acerca de cómo se comportan los sistemas de evaporación, con el objetivo de realizar un diseño adecuado del lazo de control del sistema. Descrito en el marco teórico.

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. Designado por el área de automatización de Gloria en la planta Huachipa.

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.

4.1. Control de lazo cerrado y función de transferencia

El control automático involucra mantener un valor o magnitud dentro de un rango deseado o cercano a un valor constante, el cual es dado a través de una consigna de entrada. En la actualidad del control del proceso involucra controlar caudal, temperatura, velocidad, presión, etc.

El control de variables físicas consiste en sistema de variables estables por naturaleza y de variables inestables. Para las variables estables se diseña el controlador para alcanzar el valor de la consigna en un tiempo

determinado. Pero para el sistema inestable primero es necesario estabilizar el sistema luego llegar al valor de referencia o consigna.

En la práctica para diseñar e implementar el control se debe aplicar los conocimientos matemáticos y físicos del proceso a modelar, así mismo la tecnología vigente. Hay que tener presente que el control o la regulación debe ser eficaz, rápida, precisa y sin oscilaciones para corregir a tiempo las desviaciones.

El control de lazo cerrado consiste en un sistema que recibe realimentación para ajustar la salida en base al seguimiento de una referencia o valor deseado. Para llevar a cabo el control de lazo cerrado se requiere de sensores que convierten las magnitudes físicas en señales eléctricas y de actuadores que hacen la función contraria del sensor; convertir las señales eléctricas procesadas en magnitudes físicas, para accionar el control del sistema. En la actualidad los sensores y actuadores industriales incorporan todo el procesamiento eléctrico y electrónico necesario para tratar la señal y garantizar que estas reflejen el estado fiel y estable posible del sistema.

Un lazo de control cerrado puede ser representado a través de un diagrama de bloques, como se muestra en la fig. 17

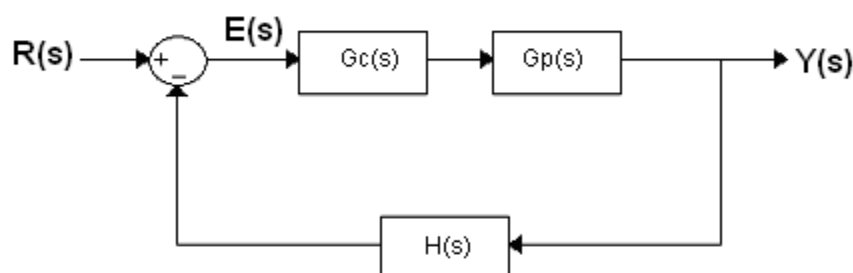


Fig. 27. Diagrama de bloques del control de lazo cerrado

Donde:

$R(s)$: 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.

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

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

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_C(s) \cdot G_P(s)}{1 + G_C(s) \cdot G_P(s) \cdot H(s)}$$

El método utilizado es de sintonización por medio de la curva de reacción de Ziegler-Nichols, método de asignación de polo arbitrario, compensadores de atraso y de adelanto. Los controladores PID se conforman de tres partes que conocen como constante proporcional (K_p), integral (K_i) y derivativa (K_d) y que define el comportamiento del sistema.

4.2. Método de la curva de reacción de ZIEGLER-NICHOLS

Con este método se pueden determinar las constantes del controlador PID en forma gráfica, mediante la curva de reacción del sistema de lazo abierto. Este método se utiliza cuando la planta cuenta con tiempo muerto provocado por algún retardo en la reacción.

El método gráfico consiste en trazar una recta tangente al punto de inflexión, de la cual se obtiene el valor de T y de L en eje temporal, como se puede observar en la fig. 28

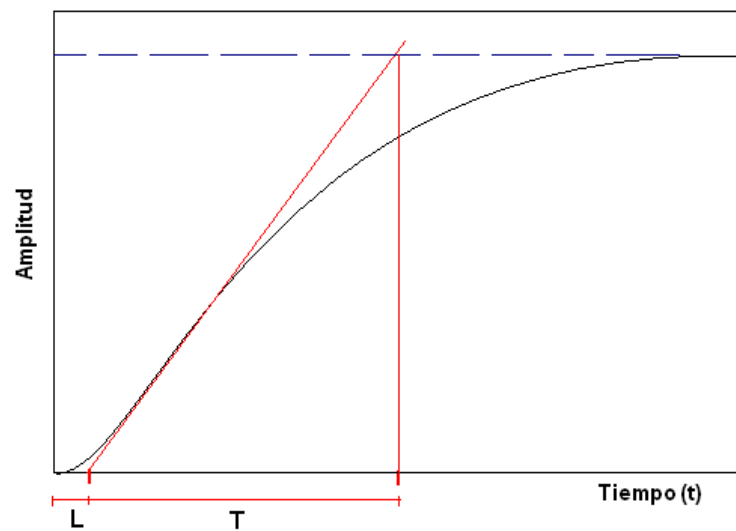


Fig. 28. Determinación de las constantes T y L en forma gráfica.

En base a las constantes T y L determinado en forma gráfica se puede determinar los valores de las constantes del controlador PID, con la siguiente ecuación.

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

Las constantes de la ecuación se pueden calcular con las relaciones de la tabla 7

Tabla 7. Relaciones para determinar las constantes en los 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

Determinamos el uso de un controlador PI también conocido como compensador de atraso, pues corrige la desviación asociada a un control proporcional, este es utilizado para mejorar el comportamiento del sistema antes cambio de rápidos en el proceso a controlar. Debido a esto es necesario modelar el sistema inicial para determinar el compensador a utilizar.

Por medio de una constante de integración T_i se corrige el error, esta indica que mientras esté 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.

4.2.1. 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 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 cálculo de los parámetros de funcionamiento del mismo.

A) Función de transferencia de control de la válvula de flujo de vapor

La válvula en forma ideal se modela como función de carrera y el caudal en la válvula se controla a través del flujo de vapor que circula por una tubería con una relación lineal. La constante lineal C_v se conoce como el coeficiente de flujo de válvula. El coeficiente C_v es proporcionado por la hoja de datos de la válvula.

Valores C_v (US)

Tamaño	1/2" (DN15)	3/4" (DN20)	1" (DN25)	1 1/4" (DN32)	1 1/2" (DN40)	2" (DN50)	2 1/2" (DN65)	3" (DN80)	4" (DN100)
Equiporcentual	4,7	7,4	11,7	18,7	29,3	42	74	117	187
Cierre todo/nada	4,7	7,4	11,7	21,0	32,8	59	99	137	211

Para el cierre equiporcentual se dispone de tres pasos reducidos, para más detalles ver 'opciones válvula LEA ' TI-P304-03.

Para convertir $C_v(\text{UK}) = C_v(\text{US}) \times 0,833$ $K_v(\text{S}) = C_v(\text{US}) \times 0,855$

Fig. 29. Hoja técnica y características de la Válvula Proporcional

Para el control del flujo de vapor se utiliza la válvula de hierro fundido SPIRAX SARCO a través de una tubería de 2 1/2 pulgadas; la siguiente relación se encuentra en la hoja de datos de la válvula.

$$K_v = 0.855 * C_v = 0.855 * 74 = 63.27$$

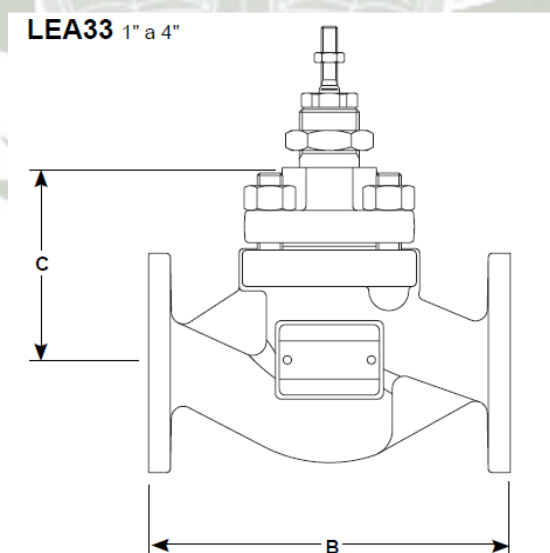


Fig. 30. Modelado de Válvula Proporcional

Cuando la presión diferencial en los extremos de la válvula es constante la relación entre la carrera del pistón y el caudal es proporcional o lineal. El diagrama de bloque del modelo de la válvula se observa en la fig. 31

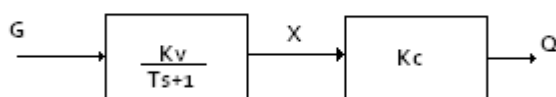


Fig. 31. Diagrama de bloques de modelo de la válvula.

En la figura anterior se encuentra la variable G que es la señal de control eléctrica (4-20 mA), el primer bloque es la característica de comportamiento de primer orden, donde K_v es la relación del flujo de la válvula cuando se encuentra abierta al 100%. El bloque K_c es la constante de la relación entre la carrera y el caudal de salida de la válvula; para el caso de LEA 33 Spirax Sarco

$$K_c = 50/1.$$

El tiempo muerto o retardo de la válvula según la hoja técnica es de 50 ms o 0.05s.

En base a los datos tomados y aplicando el modelo de primer orden de la válvula se tiene lo siguiente:

$$G(s) = \frac{K_v}{\tau_v \cdot s + 1} = \frac{63.27}{0.05 \left(s + \frac{1}{0.05} \right)} = \frac{1265.4}{s + 20}$$

B) Función de transferencia del sensor se temperatura

El sensor de temperatura es del tipo RTD/Pt100 Burns de 3 hilos, y el transmisor de temperatura a utilizar es el TMT 182 de Endress Hauser que muestra en la hoja de datos el tiempo de respuesta de transmisión de 1.5s para RTDs.

Performance characteristics

Response time	1 s (TC), 1.5 s (RTD)
Reference operating conditions	Calibration temperature: +25 °C (77 °F) ± 5 K (9 °F)

Fig. 32. Performance de transmisor TMT 182

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.

Si se observa la ecuación del modelo de primer orden correspondiente a la respuesta de un sensor, se tiene la parte que corresponde al tiempo de respuesta del sensor el cual equivale a 1.5 segundos según la hoja de datos técnicos, y con ello se completa el modelo de la siguiente forma:

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

Dónde: $\tau_T = 1.5$ s.

Se tiene que la ganancia del sistema está dada por

$$K_T = \frac{\text{Rango de salida}}{\text{Rango de entrada}} = \frac{20\text{mA} - 4\text{mA}}{150^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}} \approx 0.11\text{mA}/^\circ\text{C}$$

Así, el modelo matemático completa queda de la siguiente forma:

$$G_T(s) = \frac{K_T}{\tau_T \cdot s + 1} = \frac{0.11}{1.5 \left(s + \frac{1}{1.5} \right)} = \frac{0.0733}{s + 0.67}$$

C) Función de transferencia del calor del vapor al líquido de la calandria

En la sección A) se encontró que la salida del bloque de la válvula tiene como salida un flujo dado en [m³/h], como se quiere controlar la temperatura en la calandria, donde se lleva a cabo la evaporación, 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 22 se muestran las diferentes variables que interactúan en intercambio de energía en la calandria, donde la variable a controlar es la temperatura del líquido presente en la leche.

Como se observa 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 líquido presente en el evaporador

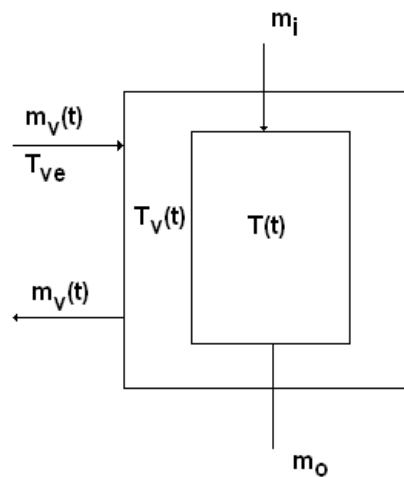


Fig. 33. Esquema para el balance de energía en la calandria.

Así, el balance de masa tiene de la siguiente forma, este mismo relaciona masa de vapor que entra en la calandria con la masa vapor que sale, y la cantidad de energía que transmite al sistema:

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

Donde:

m_{VE} = masa de vapor entrante

m_{VS} = masa de vapor saliente

Para que exista conservación de la energía en el evaporador se tiene la siguiente derivada de flujo:

$$Q_{entra} - Q_{sale} = m_V \cdot c_V \cdot \frac{dT_V}{dt}$$

Donde:

mV - masa de vapor

CV - Calor específico

TV - temperatura de vapor

t - tiempo.

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 está dado por:

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

Donde:

C = Capacidad calorífica del vapor

T = Temperatura del vapor

Por lo tanto realizando las sustituciones encontramos la ecuación diferencial que describe el comportamiento del vapor dentro del evaporador:

$$\dot{m}_{VE}(t)C_{VE}T_{VE} - UA(T_v(t) - T(t)) = m_v C_v \frac{dT_v(t)}{dt} \quad (1)$$

Esta ecuación de primer orden relaciona la energía calorífica cedida por el vapor vivo y la temperatura del líquido que fluye por la calandria del evaporador. De acuerdo a la gráfica de la figura 22 se puede notar que existe un flujo de líquido de entrada m_i y uno de salida m_o , esto representa la leche que entra a la calandria del evaporador por lo que se relaciona la temperatura del mismo con un flujo constante que usaremos en el proyecto. Sin embargo se tomara en cuenta el modelo matemático del evaporador completo, ya que si se observa en la ecuación anterior se tiene 3 variables dependientes del tiempo $m_{VE}(t), T_v(t)$ y $T(t)$

Para lograr reducir a dos variables dependientes del tiempo 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, por lo tanto:

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

La energía de entrada en los tubos está 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

$$\dot{m}_{LE}C_{LE}T_{LE} + UA(T_v(t) - T(t)) - \dot{m}_{LE}C_{LE}T(t) = m_L C_L \frac{dT(t)}{dt} \quad (2)$$

Estas dos ecuaciones representan el comportamiento del evaporador contemplando el intercambio de energía. Poder relacionar ambas ecuaciones resulta complicado, por lo que para simplificar el análisis

se procederá a realizar un diagrama de bloques que involucre cada una de las componentes en ambas ecuaciones.

Para construir el diagrama de bloques con base a ambas ecuaciones, se procede a realizar la transformada de Laplace y expresarlas en el dominio “s”:

Para la ecuación anterior se tiene:

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

Aplicando Laplace:

$$\dot{m}_{LE}C_{LE}T_{LE} + UAT_v(s) - UAT(s) - \dot{m}_{LE}C_{LE}T(s) = m_Lc_LsT(s)$$

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

$$(\dot{m}_{LE}C_{LE}T_{LE} + UAT_v(s) - UAT(s) - \dot{m}_{LE}C_{LE}T(s)) \frac{1}{m_Lc_Ls} = T(s) \quad (3)$$

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

$$\dot{m}_{VE}(t)C_{VE}T_{VE} - UA(T_v(t) - T(t)) = m_vC_v \frac{dT_v(t)}{dt}$$

Aplicando Laplace:

$$\dot{m}_{VE}(t)C_{VE}T_{VE} - UAT_v(s) - UAT(s) = m_vC_v sT_v(s)$$

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

$$(\dot{m}_{VE}(t)C_{VE}T_{VE} - UAT_v(s) - UAT(s)) \frac{1}{m_vC_v s} = T_v(s) \quad (4)$$

Diagrama de control de un proceso de pasteurización de leche. El sistema tiene dos entradas: "MASA DE LECHE O FLUJO DE LECHE ENTRANTE ML" (5.56) y "MASA DE VAPOR O FLUJO DE VAPOR DE ENTRADA mVE" (120). La salida es la temperatura de la leche $T(s)$. El controlador es un PID con ganancias 65, 44 y 0.044. El proceso tiene constantes de tiempo $1/s$ y $1/(mL \cdot CL)$. El controlador también tiene una ganancia de 0.016 y una constante de tiempo $1/s$. El diagrama muestra la estructura de control con sumadores, integradores y ganancias.

Fig. 34. Diagrama de bloques del evaporador

$$\dot{m}_{LE} = \dot{m}_{LS} = 20000 \text{ Kg/h}$$

Haciendo la conversión a Kg/s:


57

El cálculo 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 del proceso y A es el área de contacto total en los tubos de la calandria gracias a la información de GEA evaporación, con la pendiente a sistemas de evaporación se tiene que:

$$Q = \dot{m}_{LE} * H_{EVAPORACION} = 5.5 \frac{Kg}{s} * 564 \frac{Kcal}{Kg} = 3102 \frac{Kcal}{s}$$

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

$$T = \frac{60^{\circ}C + 70^{\circ}C}{2} = 65^{\circ}C$$

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

$$A = \pi * r^2 * h_{TUBOS} * Numerotubos = \pi * 0.035^2 * 3.77 * 522 = 7.57 m^2$$

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

$$U = \frac{Q}{T * A} = \frac{3102 Kcal/s}{70^{\circ}C * 7.57 m^2} = 5.85 \frac{Kcal}{^{\circ}Csm}$$

El siguiente cálculo es la cantidad de masa que entra en contacto con el vapor dentro de la calandria, la cual está 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:

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

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

$$m_L = 7.57m^2 * 0.035m * 1000 \frac{kg}{m^3} = 22.71kg$$

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 evaporador m_{VE} es 75Kg, además hay que tomar en cuenta que la temperatura de entrada del líquido corresponde a 65°C.

Tabla 8. Valores calculados constantes del modelo del Evaporador

Constante	Descripción	Valor
$\dot{m}_{LE}$	Flujo de masa del líquido de entrada	$5.5 \frac{kg}{s}$
U	Coefficiente de transferencia de calor en la calandria	$5.85 \frac{Kcal}{°Csm}$
A	Área total de contacto de la calandria	$7.57 m^2$
m_L	Masa total de la pelicula que se forma dentro de la calandria	$22.71kg$
C_L	Capacidad calorifica del liquido	$1 \frac{Kcal}{kg}$
C_V	Capacidad calorifica del vapor	$0.8 \frac{Kcal}{kg}$
T_{VE}	Temperatura de entrada del vapor	150°C
T_{LE}	Temperatura de entrada del liquido	65°C

Utilizando el diagrama de lazo abierto 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.

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 35 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.

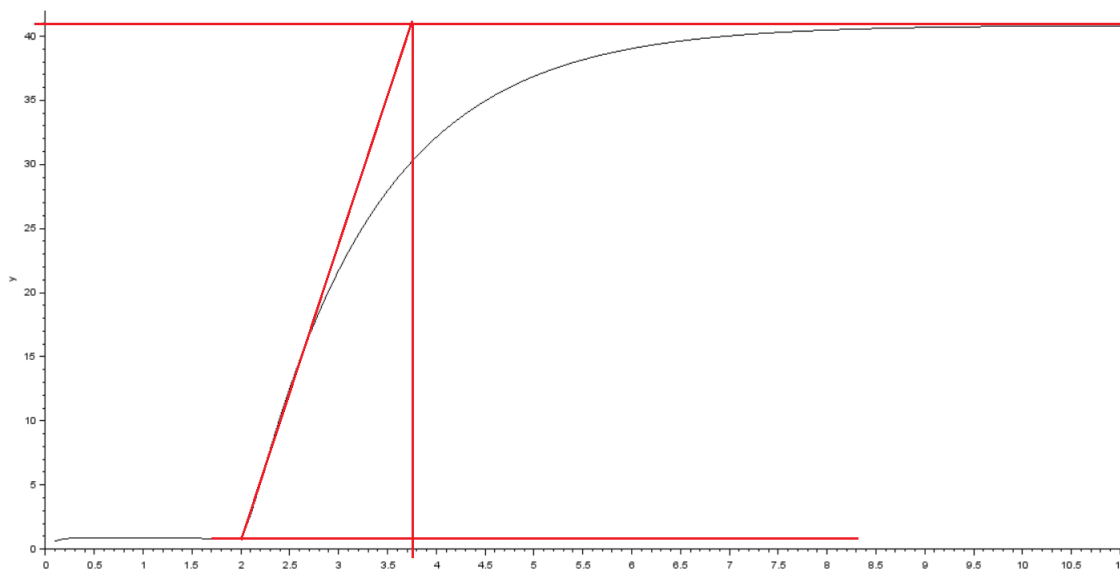


Fig. 35. Método de la curva de reacción de ziegler nichols aplicado al sistema.

En la Figura se muestra como se realizaron las trazas para el cálculo de las constantes del controlador PI, en este caso el valor de $T = 1.75$ y el de $L = 2$, usando la tabla se realizan los siguientes cálculos:

$$K = 0.9 \frac{T}{L}$$

$$K_p = 0.9 * \frac{1.75}{2} = 0,7875$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} = \frac{2}{0.3} = 6.7$$

La ecuación final con el cálculo del compensador es:

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

$$G_c = 0.79 \left(1 + \frac{1}{6.7s} \right)$$

El compensador final queda expresado como:

$$G_c = \frac{0.79s + 0.11}{s}$$

El diagrama de bloques de la Figura xx se observa el control completo con cada uno de los involucrados, el condensador, la válvula, el evaporador, y el sensor.

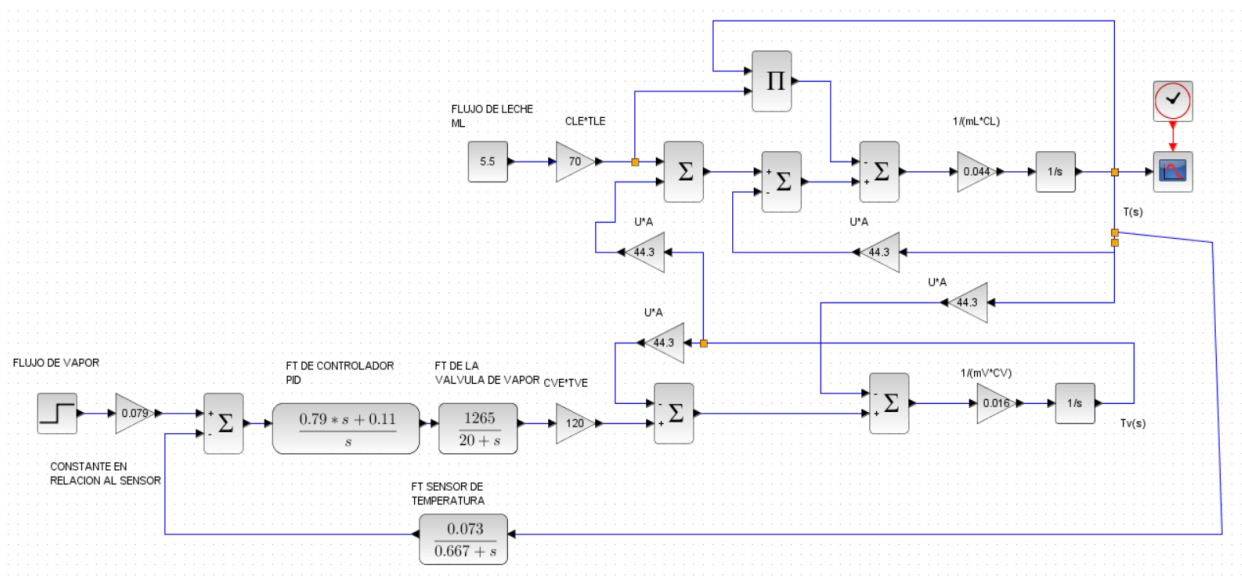


Fig. 36. Diagrama de bloques completo con el compensador PID

4.2.2. Diseño del SCADA –INTOUCH del Sistema Evaporador

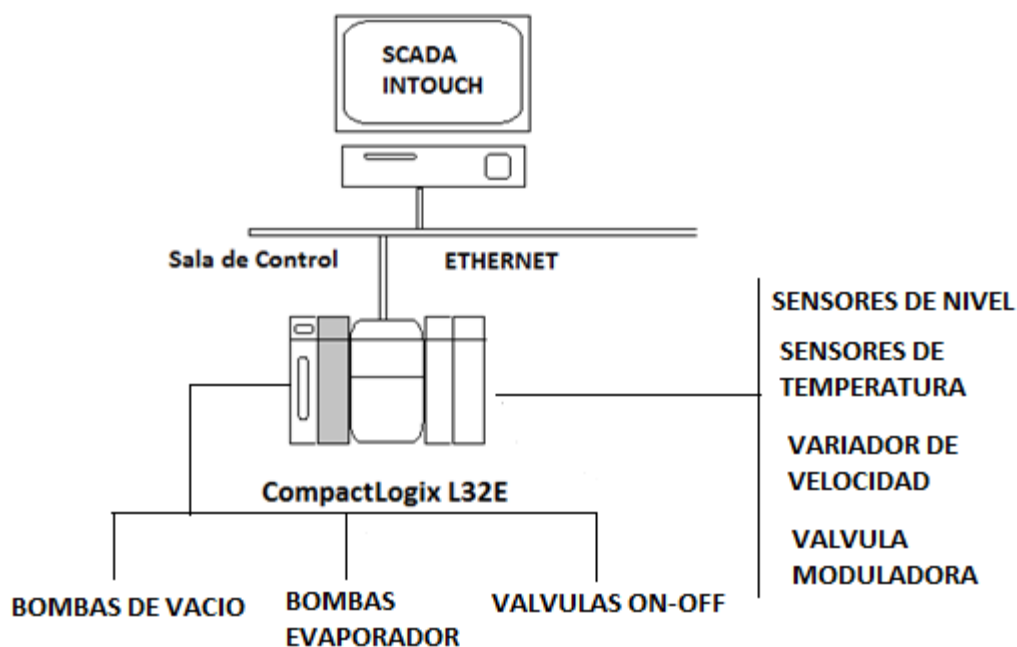


Fig. 37. Arquitectura de Red Insutrial

En esta sección no enfocaremos directamente a la implementación de los bloques de control del sistema, el correspondiente al control de temperatura.

El software de desarrollo que se utiliza es el Intouch 10.1 SP3 Wonderware, y dentro de lo contemplado en el proyecto se tiene que realizar las rutinas de control de los lazos involucrados.

- Entrada Analógica Sensor de Temperatura 4-20ma
- Salida Analógica Válvula Modulante 4-20ma

Software

- Intouch 10.1 SP3 Wonderware (SCADA)

Hardware

- CompactLogix Procesador L32E (PLC Allen Bradley)

PID

- Válvula Spirax Sarco
- Sensor Temperatura RTD PTC 100
- Transmisor 4-20 ma Endress Hauser

Configuración de Controlador PID con RSLogix5000

- Empezamos por crear un nuevo programa, para ello nos ubicamos en la pantalla principal del RSLogix 5000 y le damos click en la pestaña **Archivo**, luego de ello seleccionamos **Nuevo**.

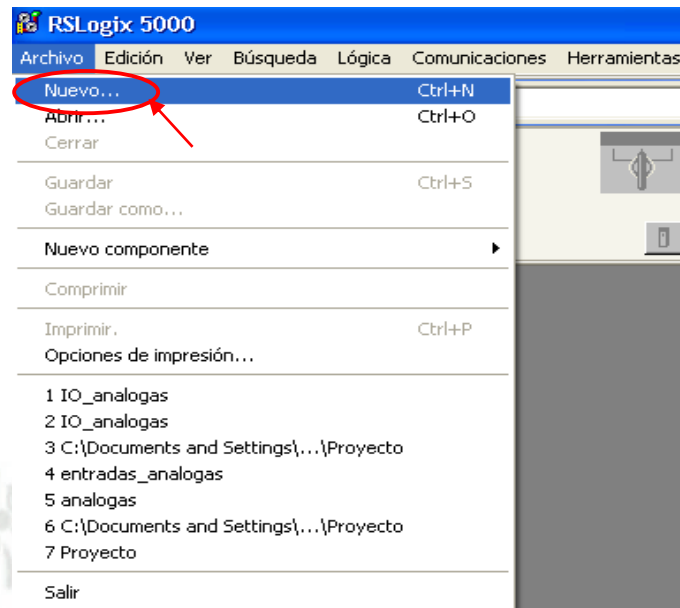


Fig. 38. Paso 1 de Implementación

- Al hacer clic en Nuevo aparece la siguiente ventana, donde seleccionaremos el tipo de controlador el cual será **1769-L32E Compactlogix** elegimos la versión 19 de nuestro procesador y haremos clic en **OK**.

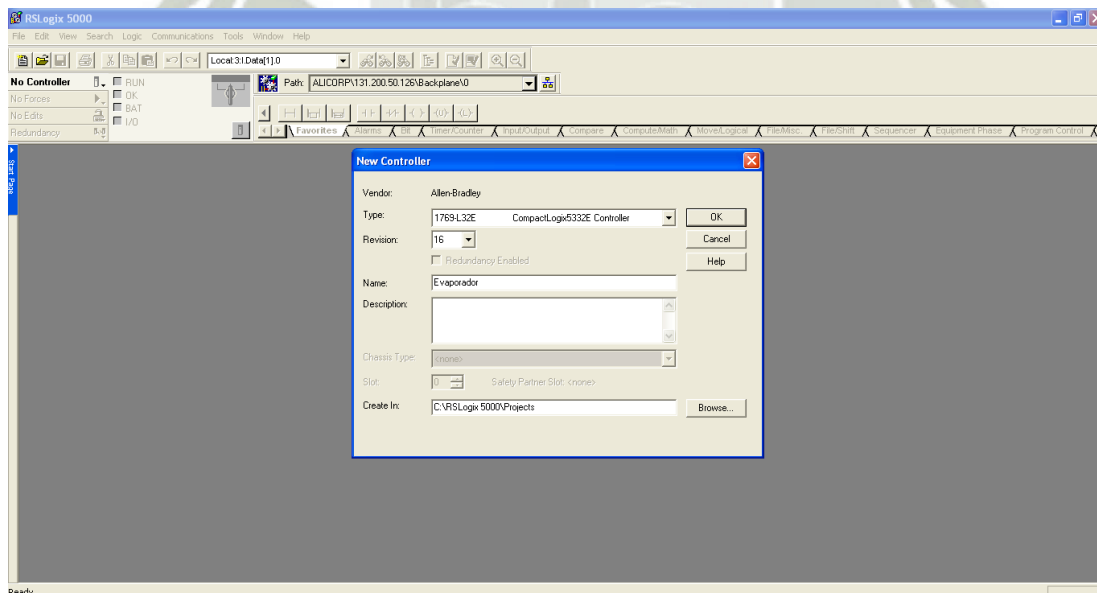


Fig. 39. Selección de PLC en Software

- Crearemos un nuevo módulo; para ello nos situamos en el menú que se encuentra a la izquierda de la pantalla principal, nos situaremos en **Configuración de I/O** y haremos clic ahí, donde se desplegara un pequeño menú donde seleccionaremos **Nuevo module**.

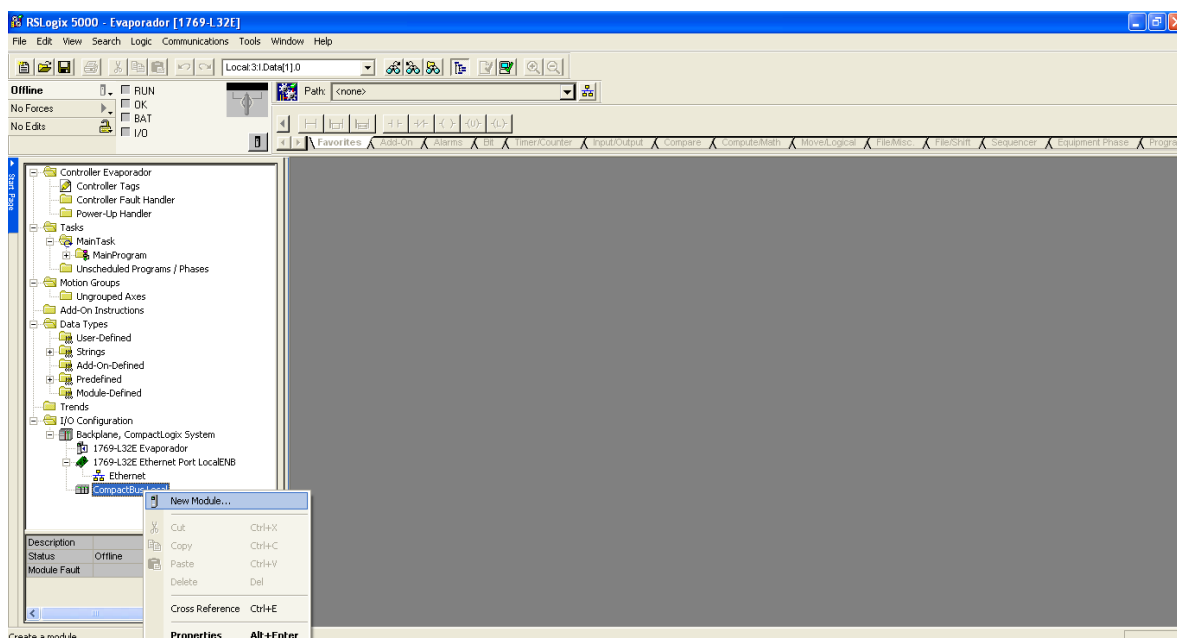


Fig. 40. Implementación Hardware

- Al hacer clic en Nuevo module aparecerá una ventana como la que se muestra a continuación donde seleccionaremos el tipo de I/O con la que se va a trabajar. En este caso trabajaremos con I/O analógicas. Primero seleccionamos la **Revisión mayor = 1** y luego la salida analógica que será **1769-IF4**. Clic en **Aceptar**.
- Daremos un **Nombre** a la salida analógica, en este caso la llamamos **Entarda_Analogica**. Seleccionamos a su vez la **Ranura 1**, la cual es la ranura de las entradas analógicas del PLC Allen Bradley.

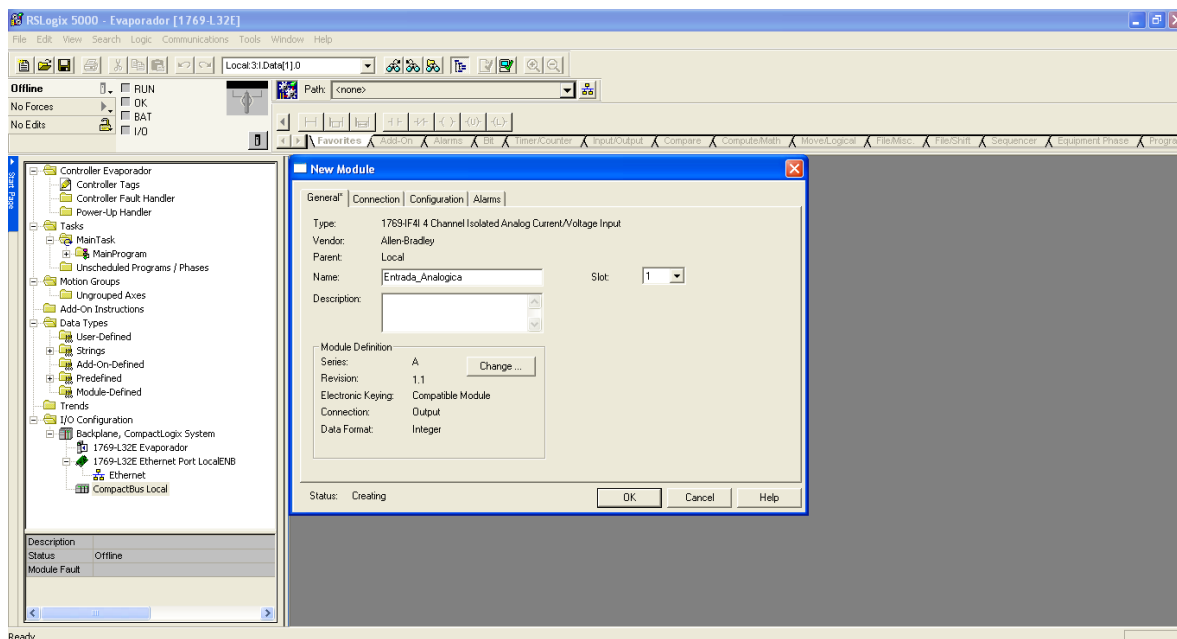


Fig. 41. Variable Salida Análoga

- Seleccionamos el tipo de entrada de 4 -20 ma.

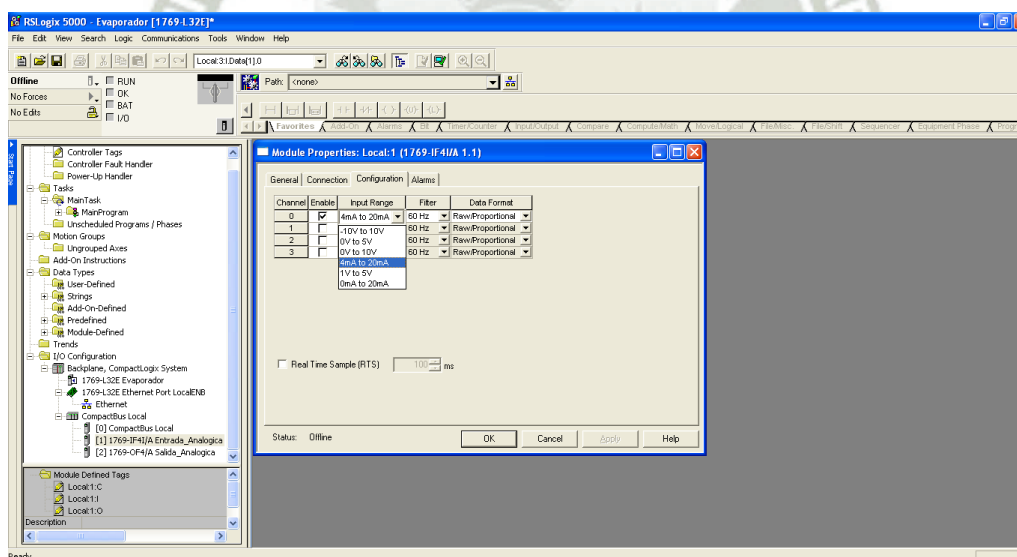


Fig. 42. Variable de salida Análoga

- Haciendo clic en Nuevo module aparecerá una ventana como la que se muestra a continuación donde seleccionaremos la salida analógica que será **1769-OF4**. Clic en **Aceptar**. y le daremos un **Nombre** a la salida analógica, en este caso la llamamos Salida_Analogica.

Seleccionamos a su vez la **Ranura 2**, la cual es la ranura de las entradas analógicas del PLC Allen Bradley

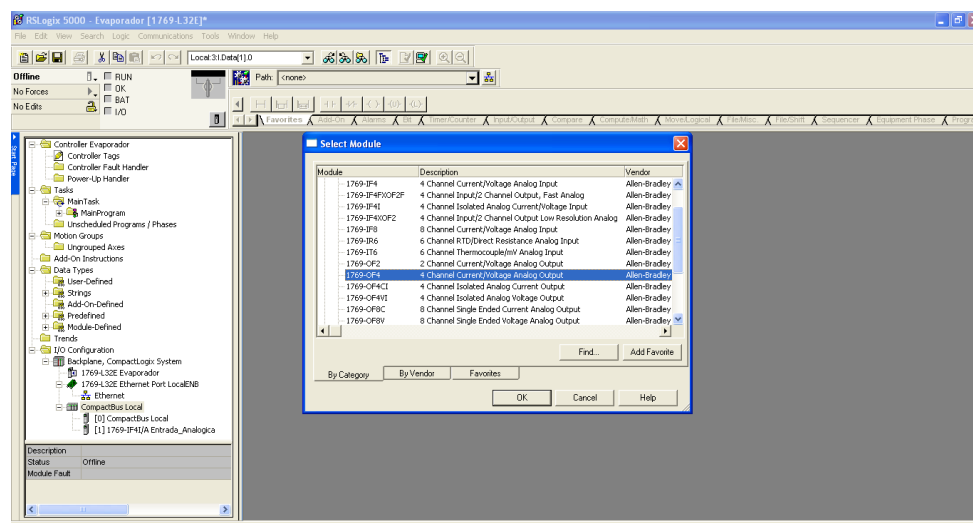


Fig. 43. Creación ranura de Salida Analógica

- Seleccionamos el tipo de salida de 4 -20 ma.

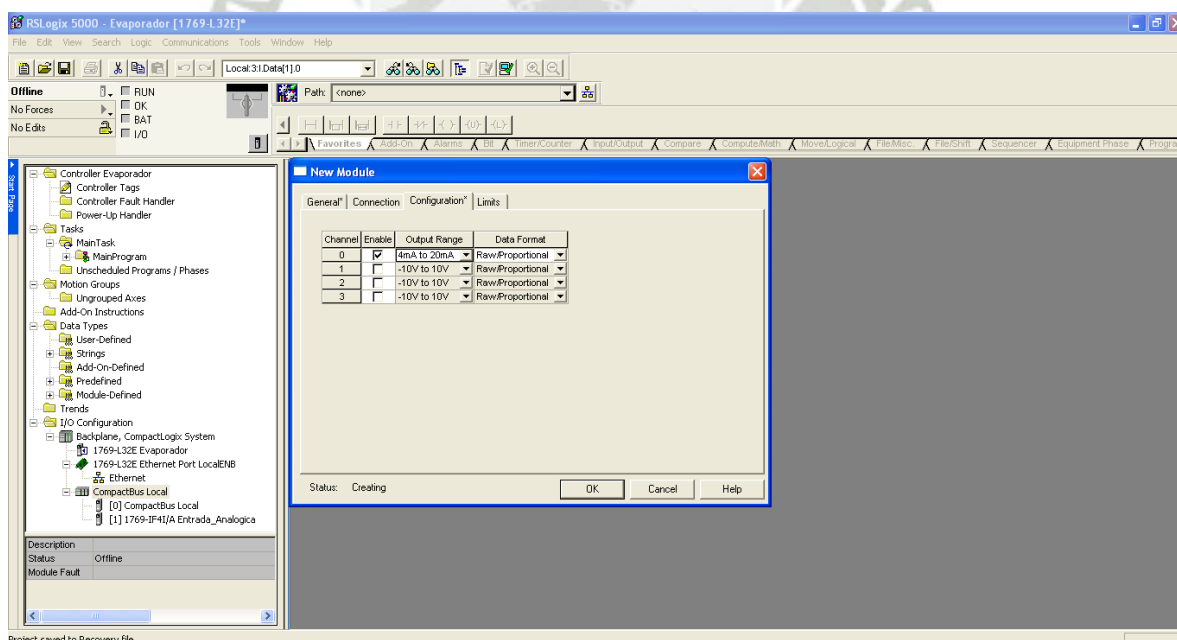
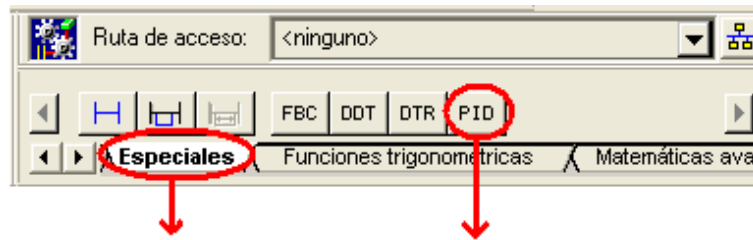


Fig. 44. Selección de Entrada Análoga

- Seleccionamos en la paleta superior la pestaña Especiales, la cual incluye el Controlador PID.



Seleccionar

Controlador PID

Fig. 45. Implementación de PID

Iniciamos el programa ingresando el bloque PID

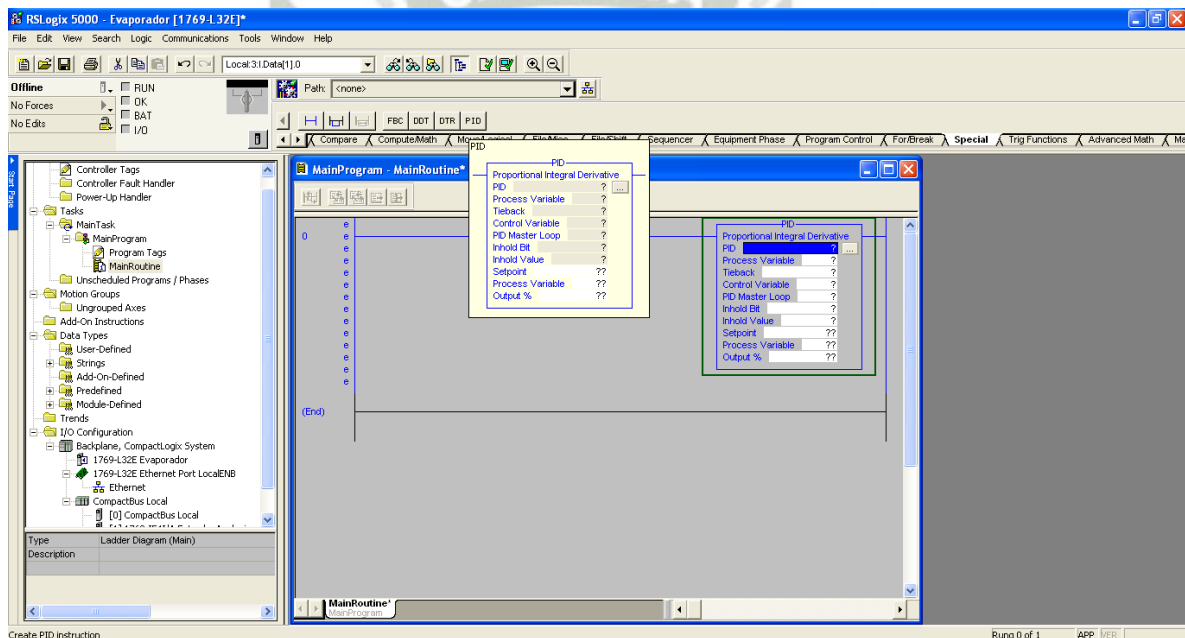


Fig. 46. Implementación Bloque PID

- Con el bloque del PID en la ventana de programación proceda a declarar las variables internas del mismo.

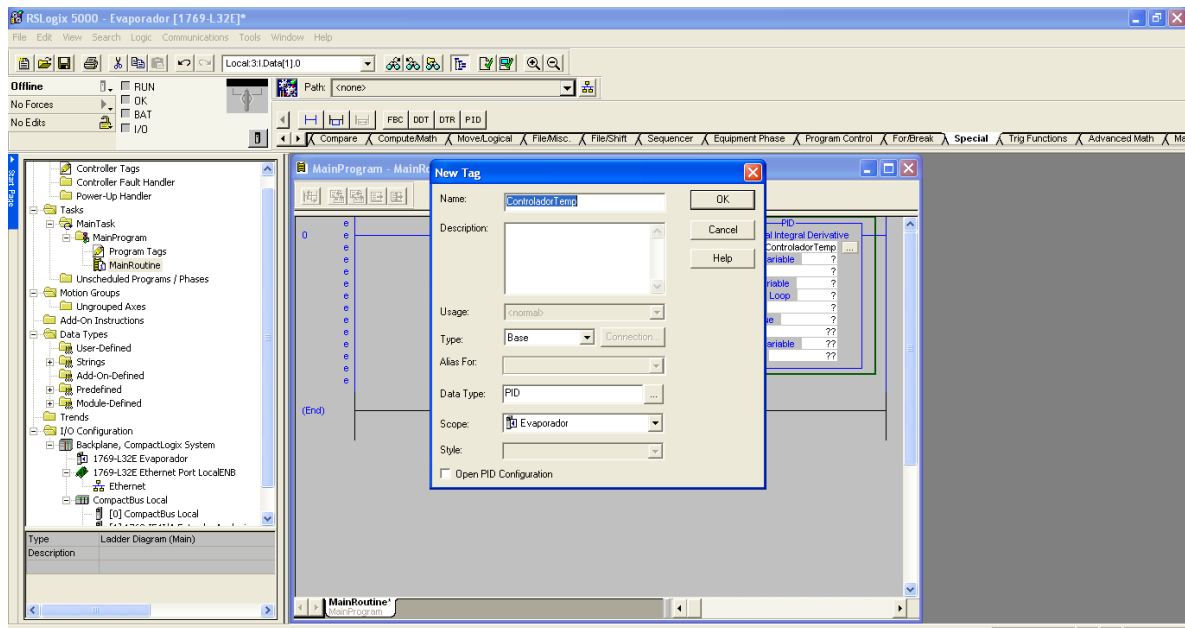


Fig. 47. Implementación Bloque PID

- Creamos el tag de temperatura el cual enlazamos con la entrada analógica 0 a través de un bloque MOVE.

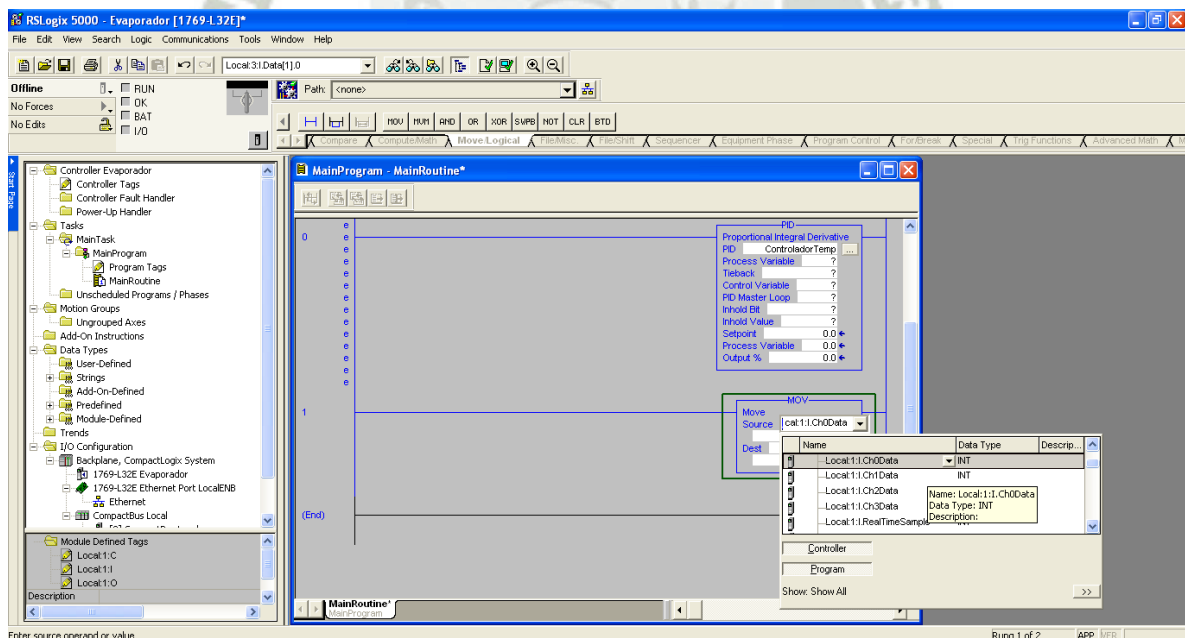


Fig. 48. Implementación Bloque PID

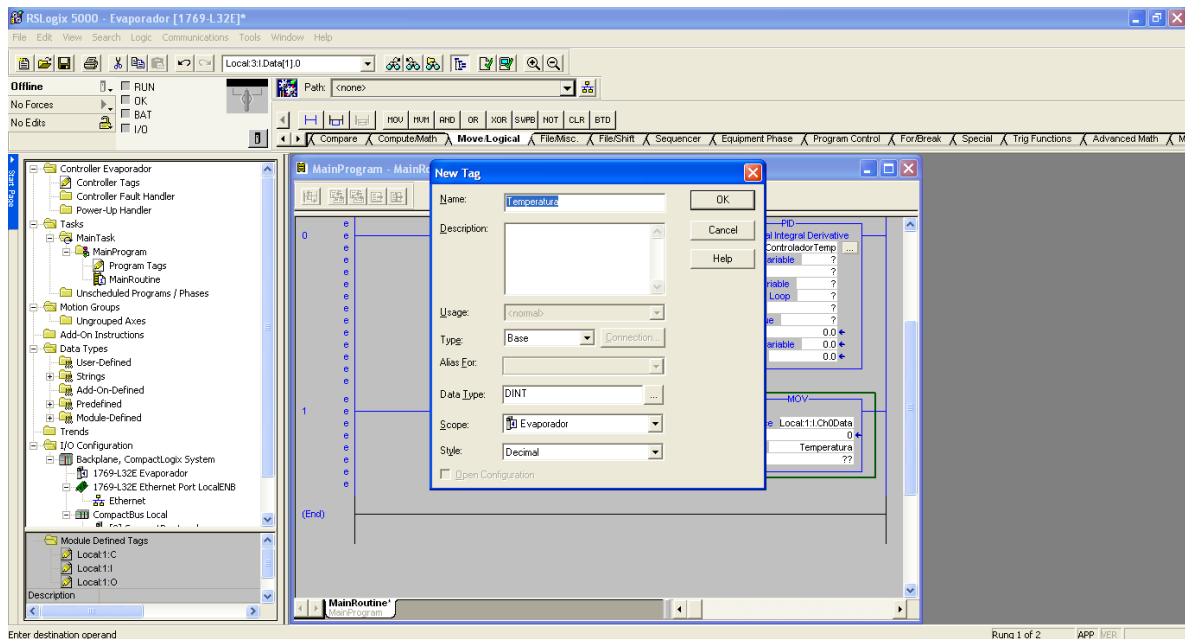


Fig. 49. Implementación Bloque PID

- Asignamos un nombre a la salida que controlara la válvula modulante.

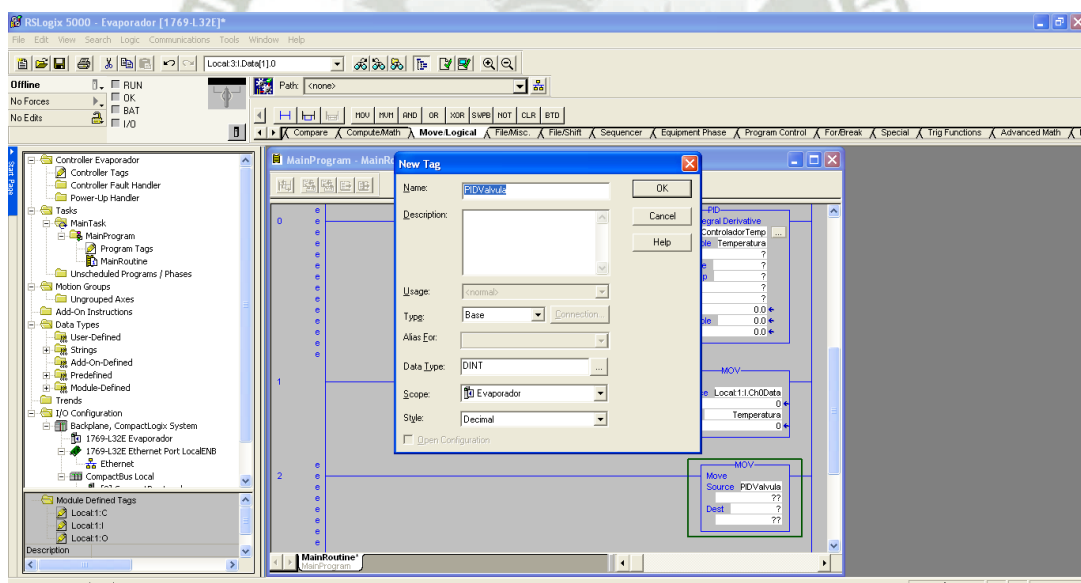


Fig. 50. Implementación Bloque PID

- 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 ajustar

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

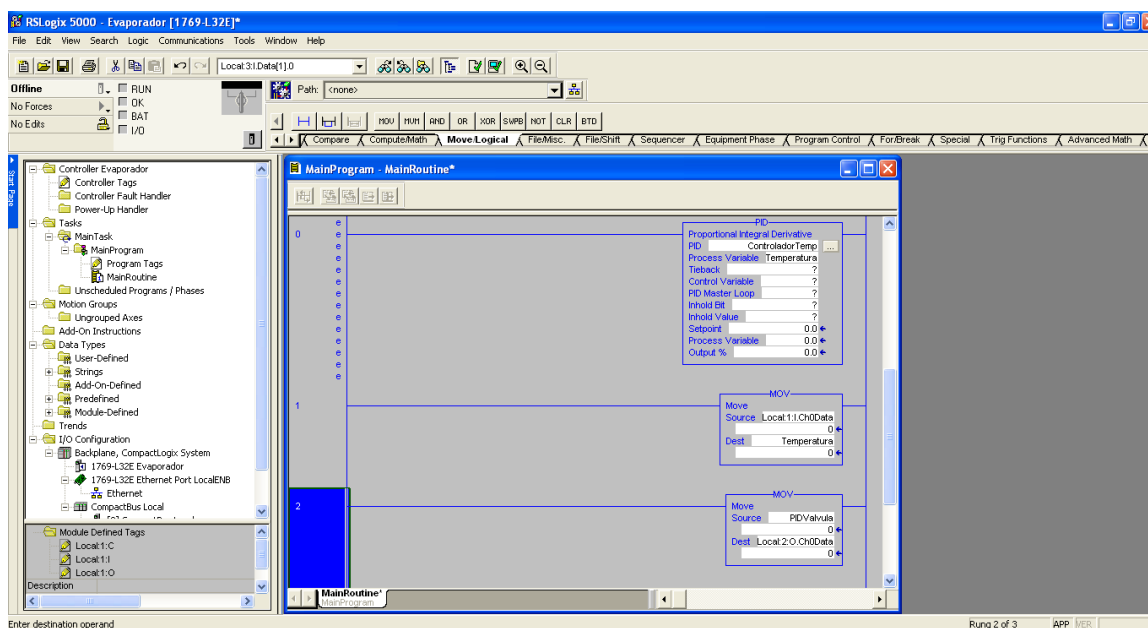


Fig. 51. Implementación Bloque PID

- Abrimos las propiedades del bloque PID haciendo click en la pestaña derecha del bloque.

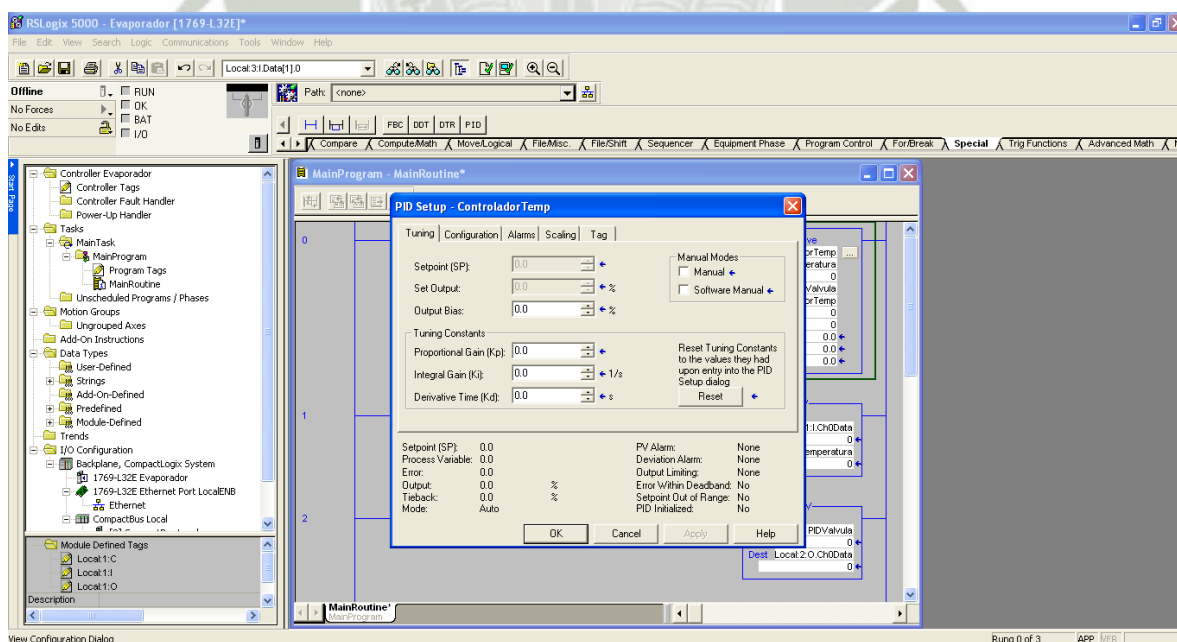


Fig. 52. Asignación de valores PI

Ingresamos las constantes Kp Ki.

De acuerdo a nuestro cálculo tenemos el compensador final queda expresado como:

$$G_c = \frac{0.79s + 0.11}{s}$$

Donde:

$$K_p = 0.79$$

$$K_i = 0.11$$

Siendo nuestro sistema un PI.

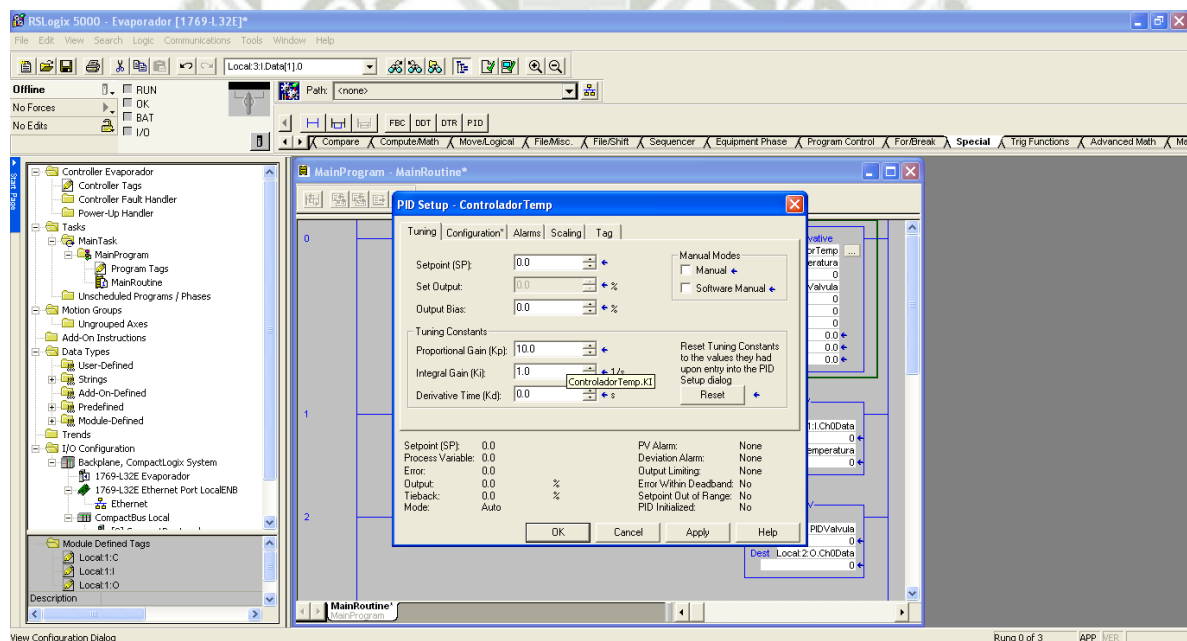
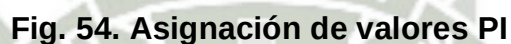


Fig. 53. Asignación de valores PI

- Tenemos nuestro bloque PI configurado y en la variable Setpoint ingresaremos el valor de temperatura deseado, esto lo haremos desde el Intouch.



-
- The screenshot displays the RSLogix 5000 software interface. The main window shows the 'Monitor Tags' dialog box, which is used for monitoring and configuring tags. The 'New Tag' dialog box is open, allowing the user to create a new tag. The 'Name' field is set to 'ScadaSetTemp', and the 'Description' field is empty. The 'Usage' is set to 'I/O Configuration', the 'Type' is 'Base', and the 'Data Type' is 'Real'. The 'Scope' is set to 'Evaporador' and the 'Style' is 'Float'. The 'Open Configuration' checkbox is checked. In the background, the 'Monitor Tags' window is visible, showing a table with columns 'Data Type' and 'Description'. The table lists several data types: AB:1769_IF4:I:0, AB:1769_IF4:I:0, AB:1769_OF4:I:0, AB:1769_OF4:I:0, AB:1769_OF4:I:0, DINT, DINT, and PID.

Fig. 55. Variable ScadaSetTemp

- A través de un bloque MOVE transferiremos el valor de ScadaSetTemp hacia la variable Setpoint del bloque PID.

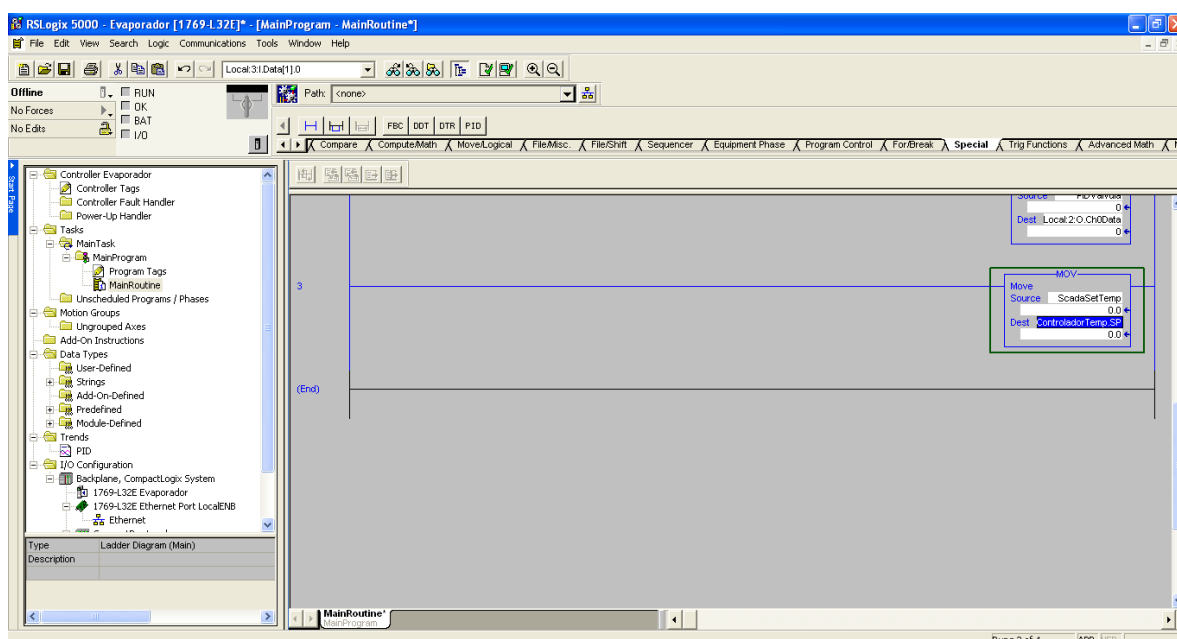


Fig. 56. Variable ScadaSetTemp

- Para poder realizar la conectividad SCADA Intouch 10.1 con PLC para esto necesitamos los IP de la PC y la IP del PLC.

Tabla 9. Asignación de direcciones IP de control

Item	Nombre Equipo	IP	
1	PC Scada	192.168.0.2	
2	PLC Allen Bradley	192.168.0.5	

Hacemos click sobre la pestaña 1769-L32E Ethernet

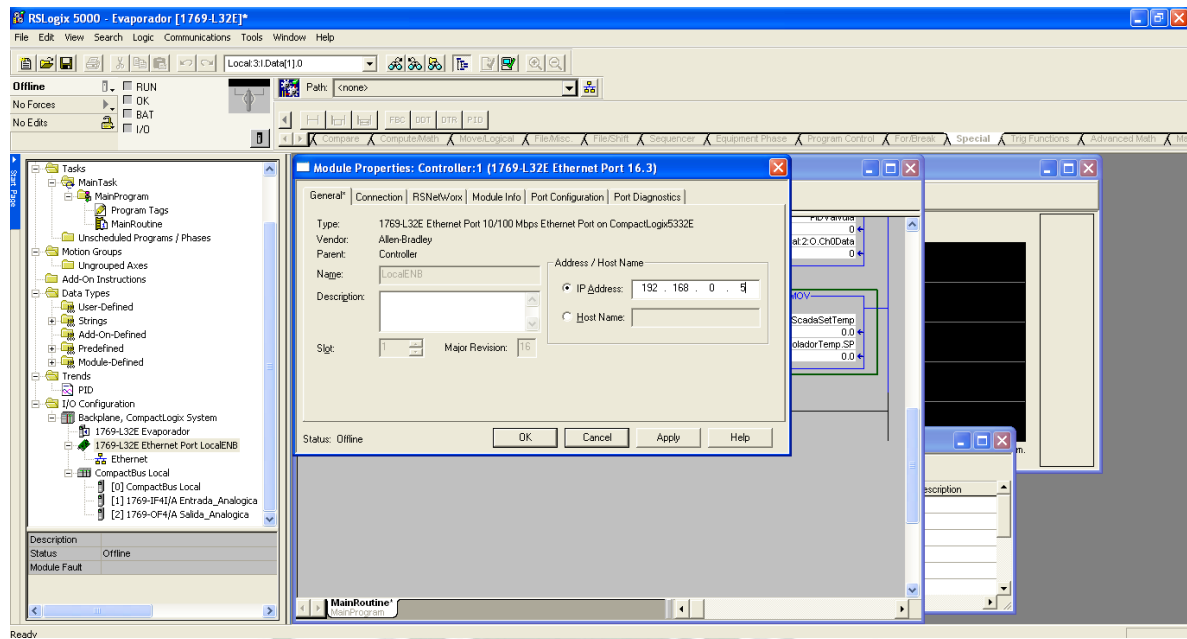


Fig. 57. Asignación de direcciones IP de control

Con esto ya tenemos el IP de nuestro PLC configurado.

Ahora en el Intouch crearemos la conexión.

- Abrimos el System Management Console.
- Creamos un Nodo llamado GLORIA

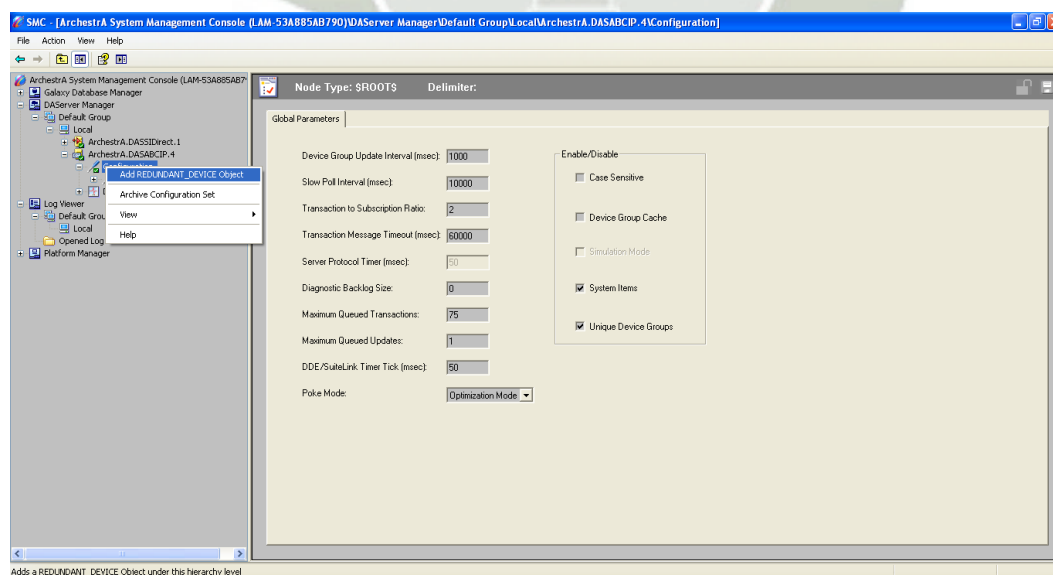


Fig. 58. System Managment Console

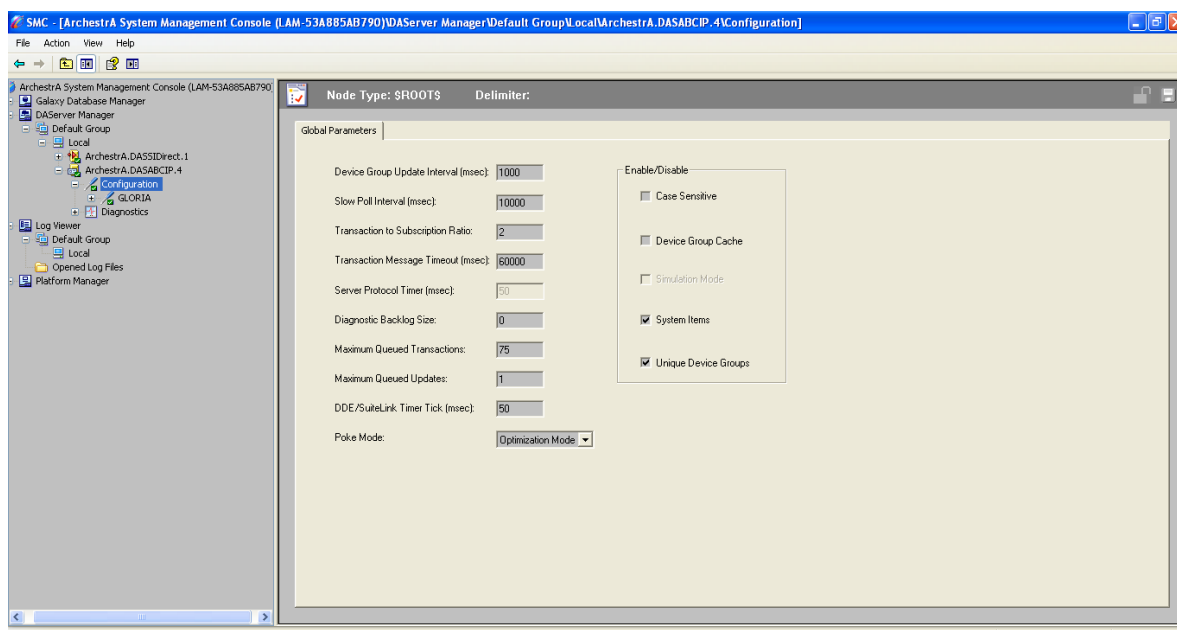


Fig. 59. System Management Console

- Creamos un Objeto con el nombre Evaporador

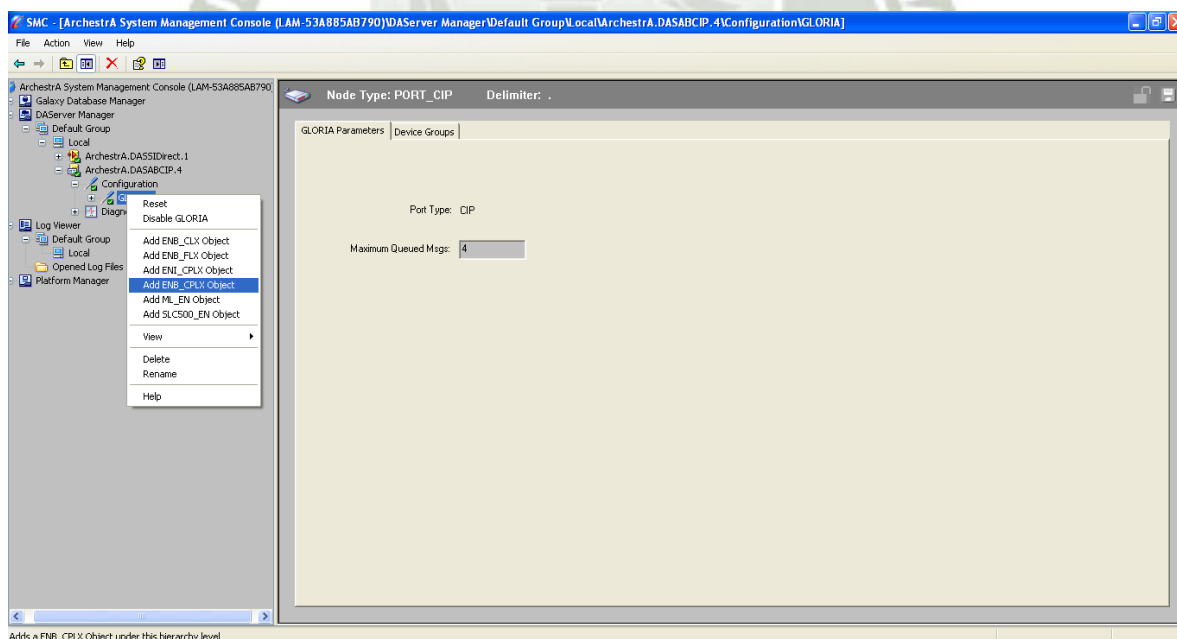


Fig. 60. Creación Evaporador en SMC

- Creamos nuestro enlace Evaporador e ingresamos la IP de nuestro PLC 192.168.0.5

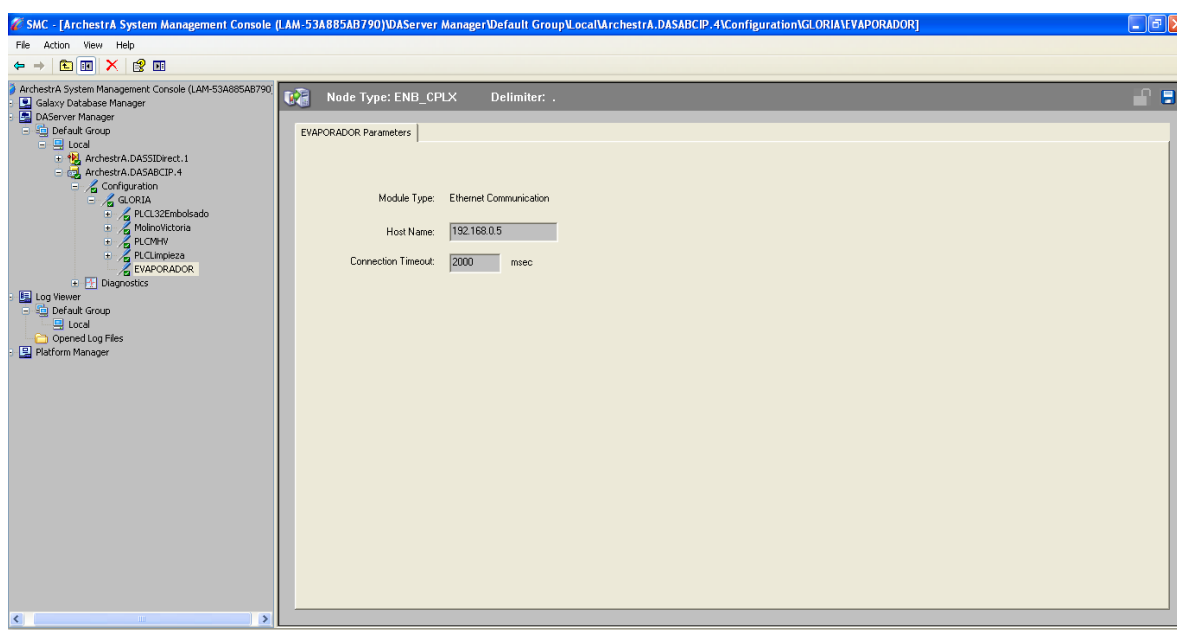


Fig. 61. Creación de Enlace

- Creamos nuestro grupo llamado Evaporador y con esto ya tenemos la comunicación del Intouch con el PLC.

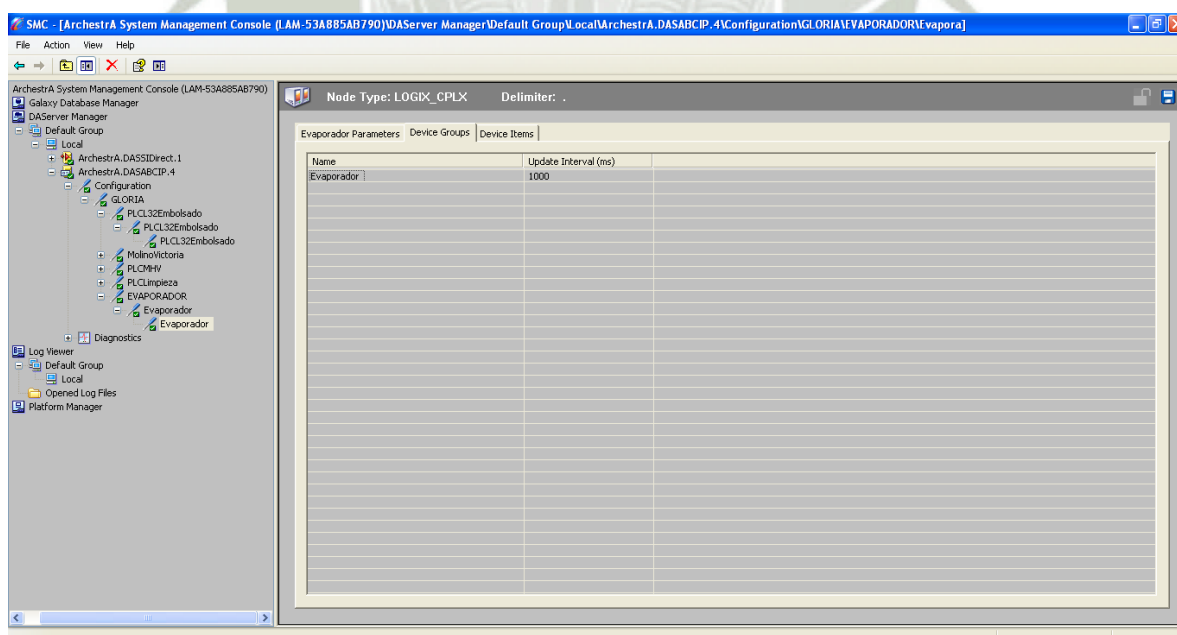


Fig. 62. Comunicación Intouch - PLC

- Ahora creamos el Access Name

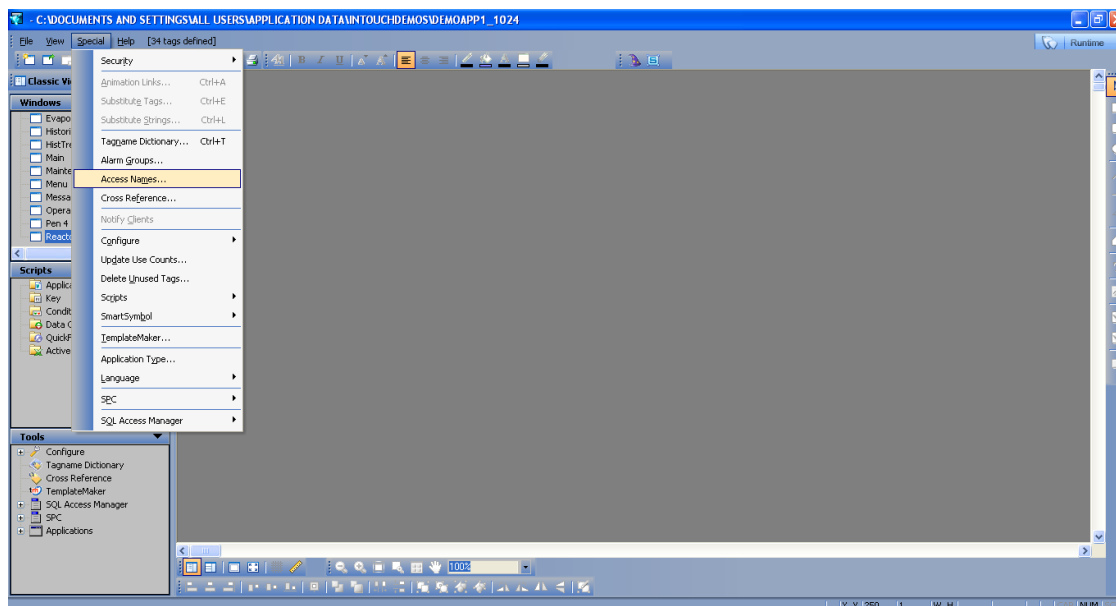


Fig. 63. Comunicación Intouch - PLC

- Colocamos el nombre Evaporador por que así se encuentra en el System Management Console.

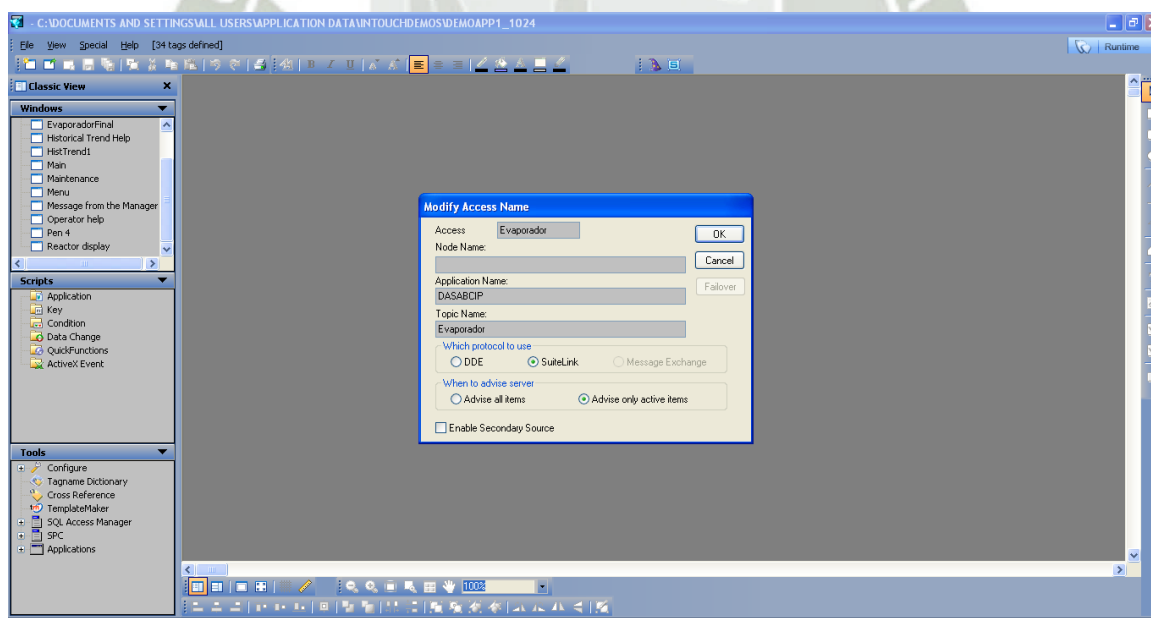


Fig. 64. Configuración SMC

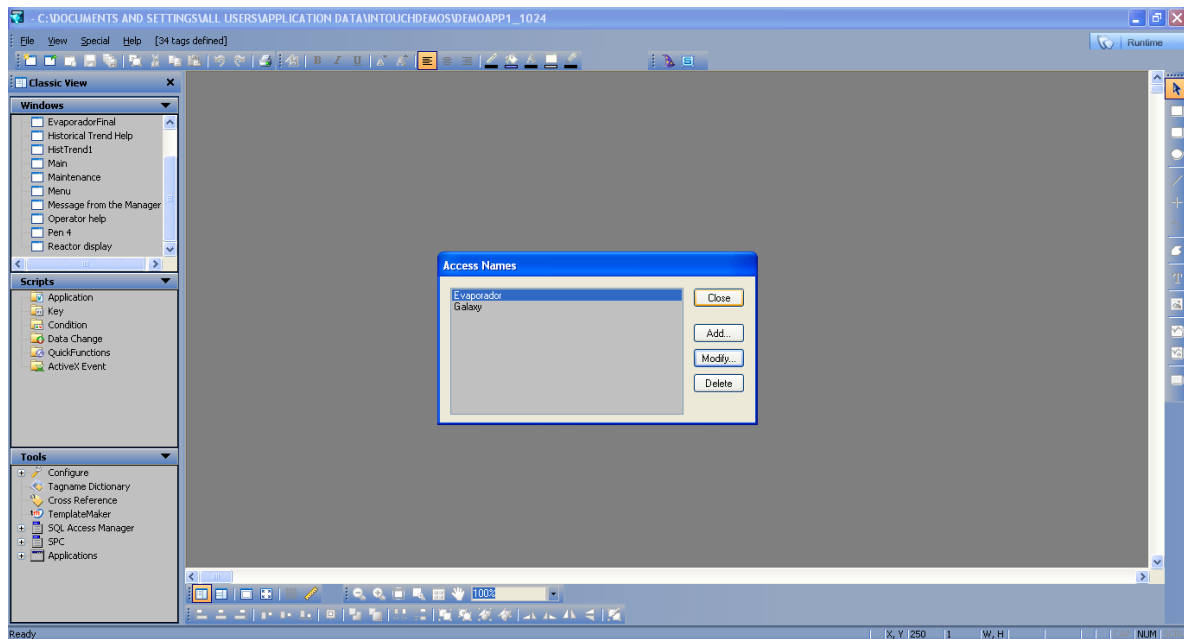


Fig. 65. Configuración SMC

- En nuestro proyecto tenemos después de realizar la asignación de gráficos

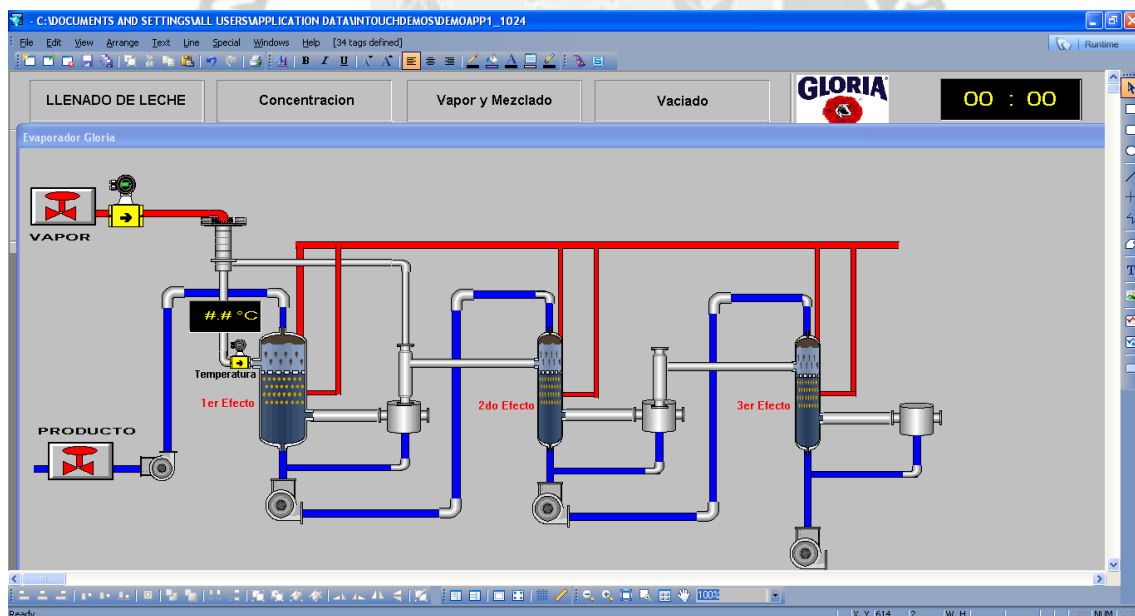


Fig. 66. Asignación de gráficos

- Ingresaremos un Text Edit el cual será el Setpoint y le damos el rango de ingreso de Temperatura.

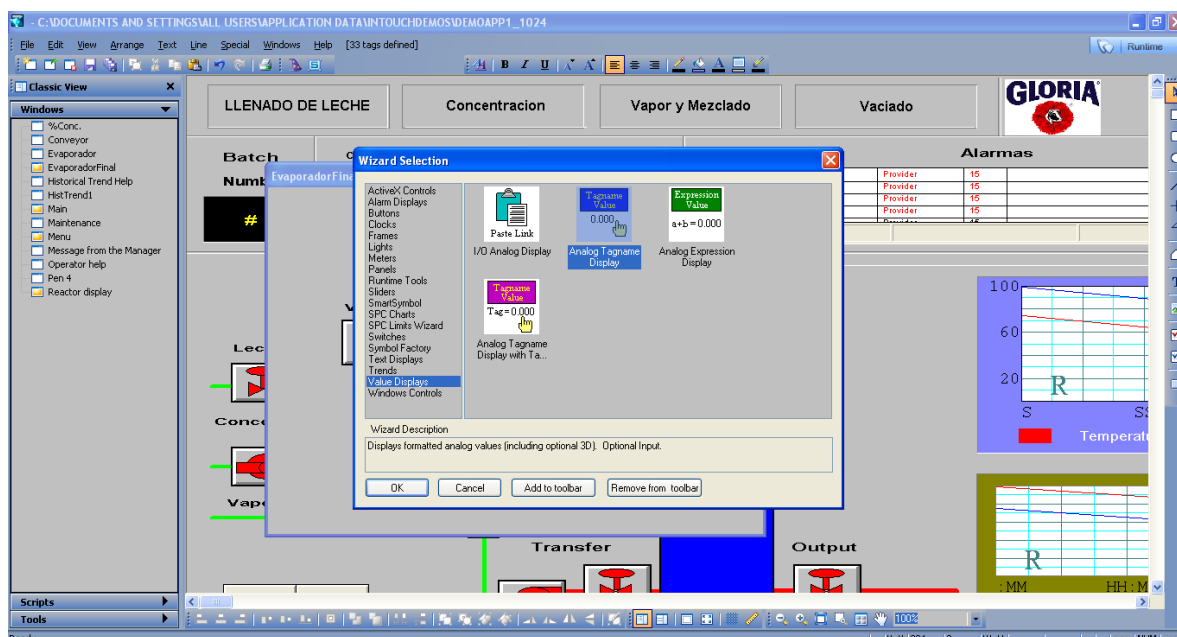


Fig. 67. Asignación del Text Edit del set point

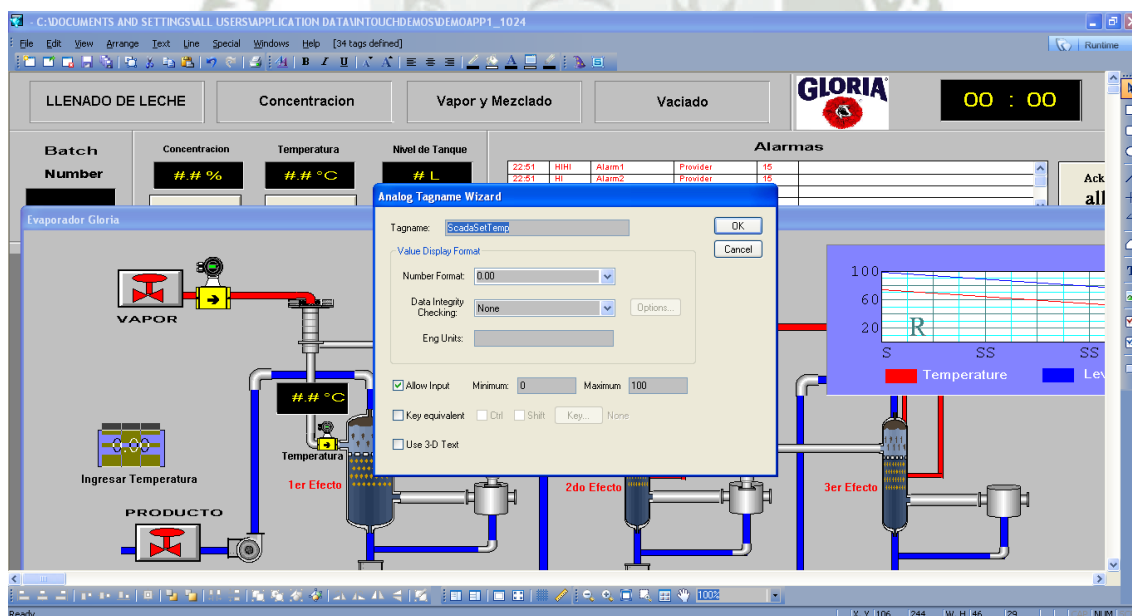


Fig. 68. Asignación del Text Edit del set point

- Ingresamos nuestra variable ScadaSetTemp.

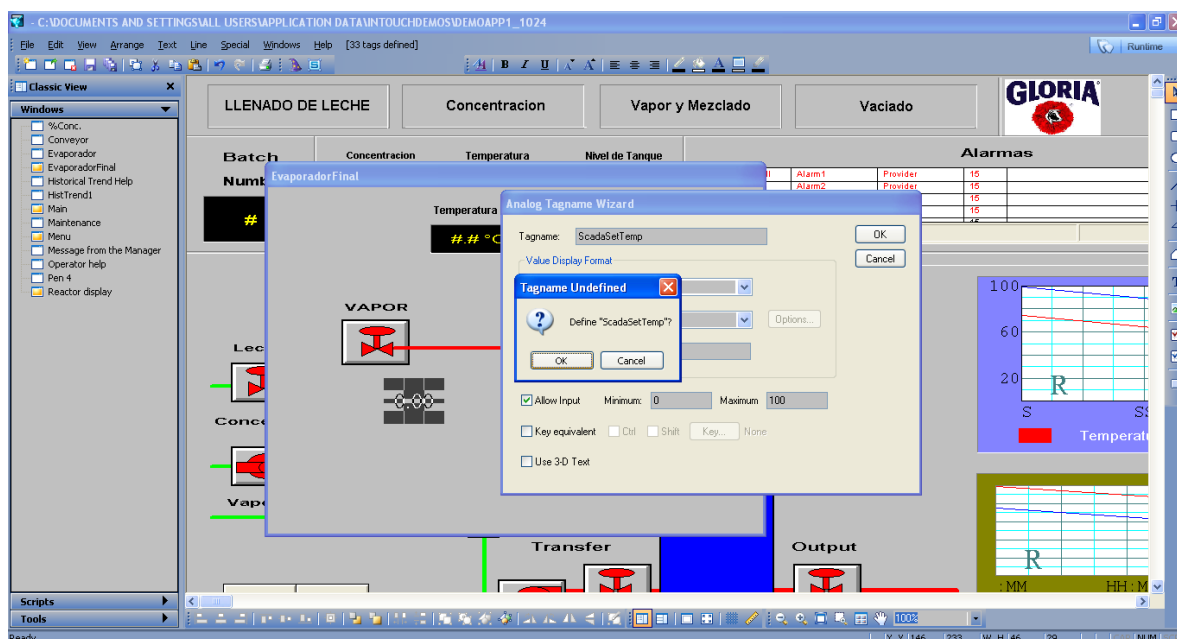


Fig. 69. Programación Variable de Control de Temperatura

- Definimos el tipo de entrada en el PLC.

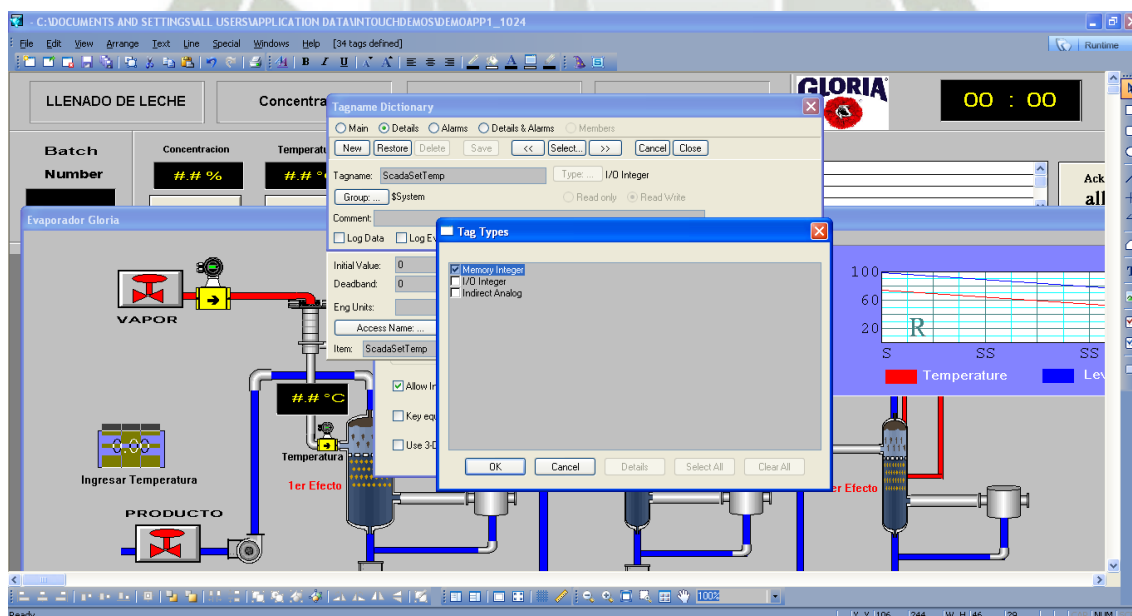


Fig. 70. Programación Variable de Control de Temperatura

- Ahora a tenemos nuestro setpoint de temperatura.

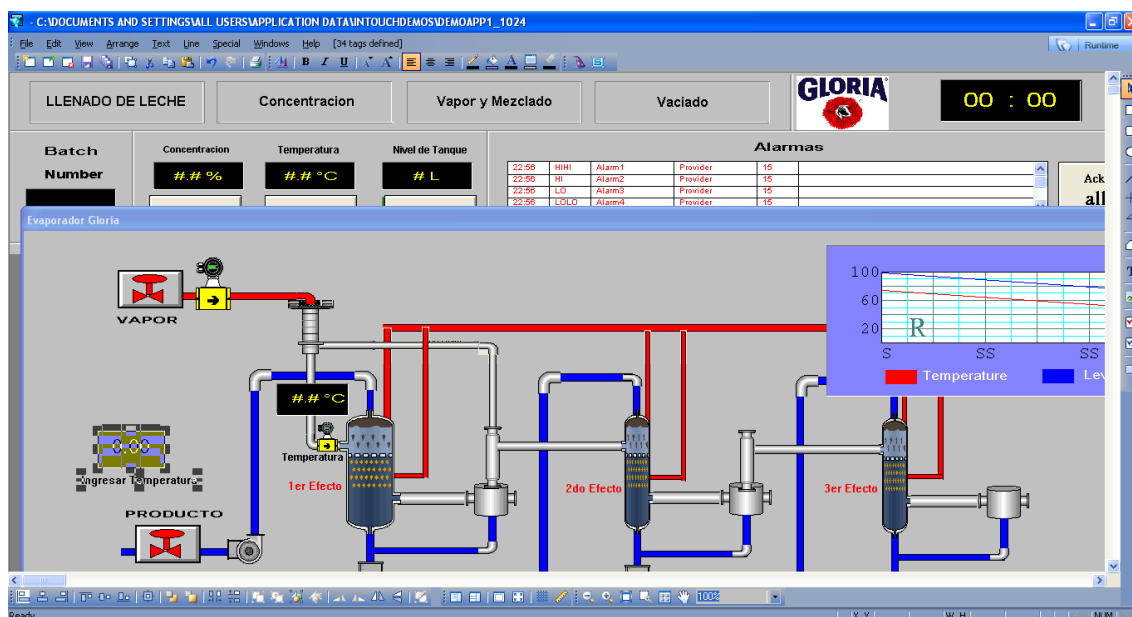


Fig. 71. Programación Variable de Control de Temperatura

Ahora ya tenemos en funcionamiento nuestro sistema.

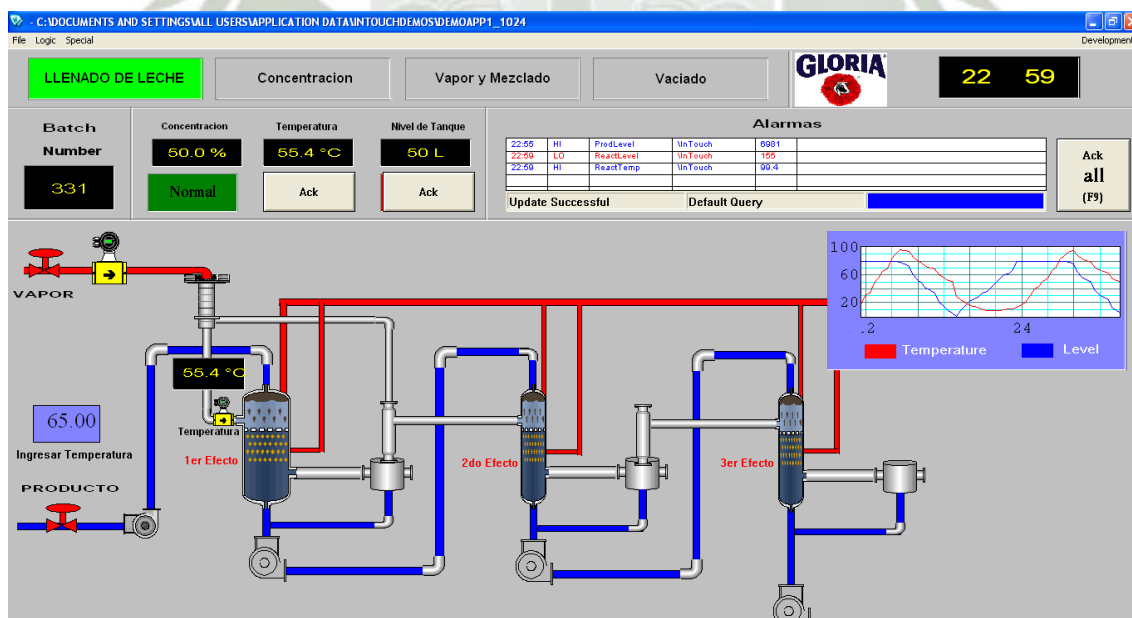


Fig. 72. Sistema final

El sistema evaporador consiste en la implementación de un controlador PID embebido con el PLC.

Se diseñó una interfaz HMI en INTOUCH de Wonderware permitiendo la supervisión y monitoreo permanente del proceso.



CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS, OPERACIONALIZACIÓN DE RESULTADOS Y FINANCIAMIENTO

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS, OPERACIONALIZACIÓN DE RESULTADOS Y FINANCIAMIENTO

5.1. Análisis de Resultados

Para el análisis de comportamiento del lazo, de temperatura, 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 él 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 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 $t = 145$ segundos, cabe destacar que para el modelo teórico

tanto como en el real, la temperatura de entrada del líquido a evaporar, en este caso la leche, posee una temperatura de 60 grados.

Con el análisis realizado y las pruebas en planta, 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 líquido 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.

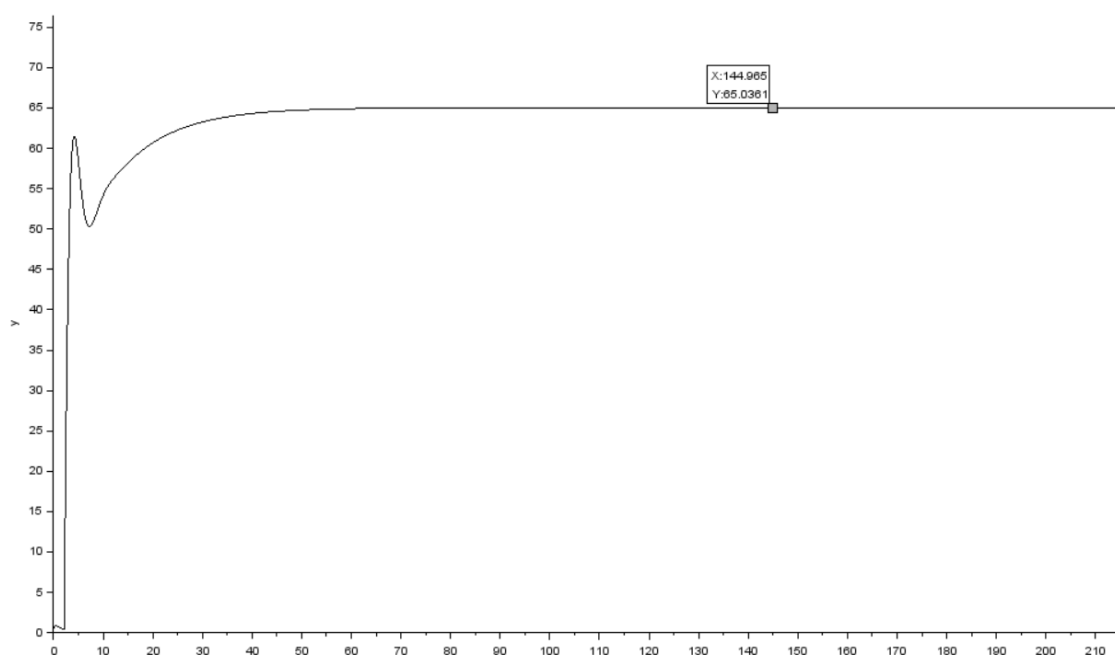


Fig. 73. Estabilidad de la temperatura en el Tiempo

5.2. Optimización de Operaciones

La automatización Industrial es un conjunto de técnicas basadas en sistemas capaces de recibir información del proceso sobre el cual actúan, realizar acciones de análisis, organizarlas y controlarlas apropiadamente con el objetivo de optimizar los recursos de producción, como los materiales, humanos, económicos, financieros, etc. La automatización de una empresa dependiendo del proyecto puede ser parcial o total, y se puede ajustar a procesos manuales o semi automáticos.

La automatización de las plantas industriales es un aspecto muy importante en el crecimiento de las empresas ya que se ven en la necesidad de:

- ✓ Incrementar la demanda del producto
- ✓ Ofrecer productos de mejor calidad
- ✓ Optimizar el consumo de energía.

La principal razón de automatizar es el incremento de la productividad, ello se logra racionalizando las materias primas e insumos, reduciendo los costos operativos, reduciendo el consumo energético, incrementando la seguridad de los procesos, optimizando el recurso humano de la empresa y mejorando el diagnóstico, supervisión y control de calidad de la producción.

El evaporador Blaw Knox es un evaporador de 3 efectos que se constituyó inicialmente por un control directo de variables como nivel, temperatura y presión comandados directamente por un sistema de control aislado en lazo simple para cada variable determinada por los Commander 250.

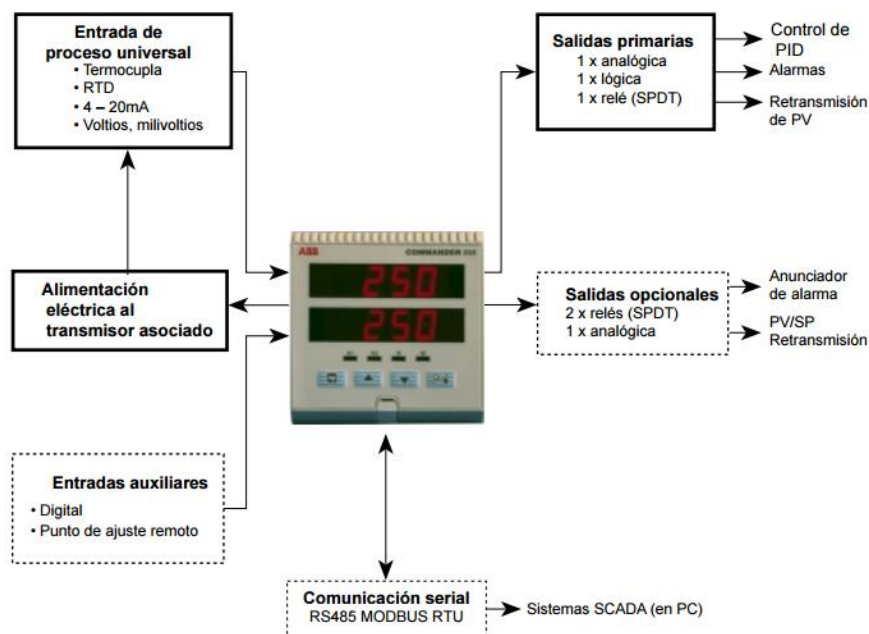


Fig. 74. Funcionalidades de Commander 250

Estos equipos son capaces de generar un control PID mediante un autoajuste que se genera debido a la respuesta del sistema o manualmente seteando los parámetros PID, generan una salida analógica o lógica frente una entrada análoga o de RTD.

En nuestro caso generaban una opción de control simple para una sola variable de control dentro de todo el proceso, por lo que se tenían que utilizar alrededor de 15 equipos para utilizarlos entre solo visualización como en el caso de un flujo y un algún nivel y entre control de variables que ya mencionamos como temperatura, nivel (presión). El control de válvulas y encendido de bombas era manual mediante pulsadores.

Tener este sistema implicaba por lo tanto que el costo operacional ascienda y las fallas por operación sean más recurrentes, ya que las aperturas de algunas válvulas se encontraban de forma manual y se tenía que abandonar la cabina de operación.

A continuación detallo algunas de las fallas que se generaban

Orden

ZM09 5216213

REP ELEC EVAPORADOR AQP

Stat.sist.

CERR NOTI DMNV MOVN NLIQ PREC

ZSR0

Datos cab.

Oper.

Componentes

Costes

Interloc.

Objetos

Datos adic.

Emplaz.

Planific.

Control

Op.	SOp	PstoTbjo	Ce...	Cl...	Clv.mod	E..	Txt.br.v.operación	TE	Trabajo	Un	C...	Dur.	Un	ClvCá	CIAct	Destinatario
0010		MTO-ELEC	101	PM01			CAMBIO DE POSICIONADOR INGRESO VAPOR		3.0 H	1		3.0 H		Calcular tra...	2200	S.ESCALANTE
0020		MTO-ELEC	101	PM01			REV CONTROLADOR IP DE PRIMER EFECTO		3.0 H	1		3.0 H		Calcular tra...	2200	L.VALENCIA

Orden

ZM01 5314237

REP ELEC EVAPORADOR AQP

Stat.sist.

CERR NOTI DMNV MOVN NLIQ PREC

ZSR0

Datos cab.

Oper.

Componentes

Costes

Interloc.

Objetos

Datos adic.

Emplaz.

Planific.

Control

Op.	SOp	PstoTbjo	Ce...	Cl...	Clv.mod	E..	Txt.br.v.operación	TE	Trabajo	Un	C...	Dur.	Un	ClvCá	CIAct	Destinatario
0010		MTO-ELEC	101	PM01			INSTALACION DIFERENCIAL DE PRESION		2.0 H	1		2.0 H		Calcular tra...	2200	R.NINA
0020		MTO-ELEC	101	PM01			REV POR MEDICION ERRONEA		2.0 H	1		2.0 H		Calcular tra...	2200	L.VALENCIA
0030		MTO-ELEC	101	PM01			MONITOREO CONTROL TERCER EFECTO		2.0 H	1		2.0 H		Calcular tra...	2200	E.PAREDES

Fig. 75. Ejemplo de fallas recurrentes (Datos obtenidos del módulo SAP PM)

Debido a que la operación era limitada, las fallas eran recurrentes y se registran el siguiente consolidado de gastos en el área de mantenimiento desde el año 2012 en el que se asume la supervisión de la parte eléctrica de la planta:

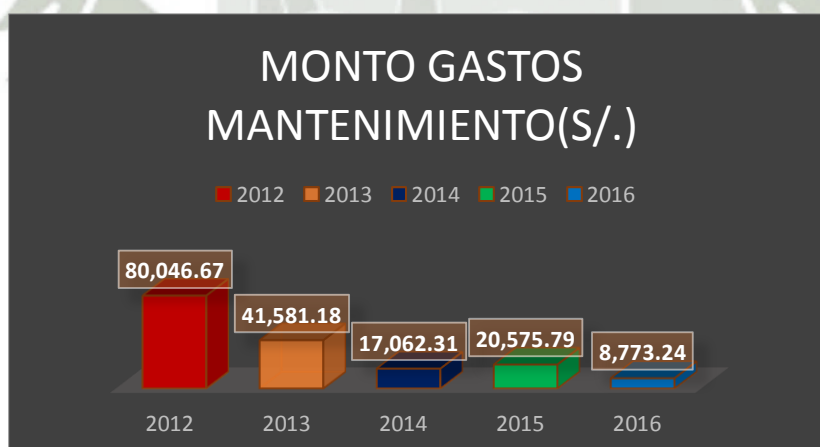


Fig. 76. Historial del monto gastos por Mantenimiento (Datos obtenidos del módulo SAP PM)

Como se ve la tendencia del gasto se va reduciendo en una forma considerable a medida que se va afianzando el proceso de automatización

hasta el 2016 en el que se observó al 90% del gasto a comparación del 2012. Fuente SAPR3

En la gráfica siguiente se verifica el gasto que se empleó en el material Commander 250 donde se va reduciendo su aplicación debido a la automatización que se va ampliando en la planta:

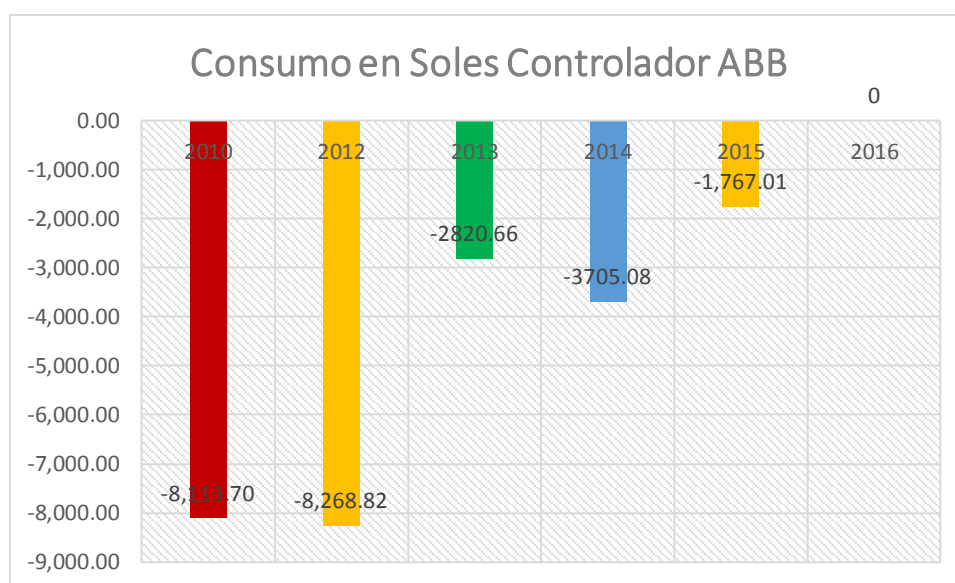


Fig. 77. Historial de la disminución de consumo de repuestos (Datos obtenidos del módulo SAP PM)

Se reduce al final a 100% el gasto y retiro del material a almacén, lo que garantiza durabilidad en el tiempo del PLC y gastos en repuestos con tendencia a 0.

5.3. Financiamiento

En función a las pruebas de la presente tesis, las mismas serán realizadas directamente en la planta de evaporación de la empresa Gloria S.A. Las mismas implican uso de recursos de proceso y energía.

Los elementos necesarios para el trabajo de tesis como los dispositivos de control, actuadores como válvulas, sensores e instrumentación y los

programas de configuraciones del control software serán financiados directamente por la empresa Gloria S.A.

5.3.1. Costos de Implementación

En la Tabla 8 podemos apreciar el listado de equipos con su costo, el cual se utilizó para la implementación.

Tabla 10. Cotización de equipos

Equipos	Descripción	Cant	Precio c/u	Precio Total
Válvula	SPIRAX SARCO (Moduladora)	1	\$3,342.00	\$3,342.00
Válvula	SPIRAX SARCO (ON-OFF)	3	\$1,322.00	\$3,966.00
Sensor temperatura	RTD BURNS + TMT182	3	\$614.00	\$1,844.00
Sensor de nivel	Sensor Diferencial de Presión	2	\$2,956.00	\$5,912.00
Bombas	Bomba Fristam FPX(Ya instaladas)	3	\$0	\$0
PLC	CPU L32E	1	\$7,766.00	\$7,766.00
	Modulo Entrada Analógica IA8	1	\$2,161.00	\$2,161.00
	Modulo Salida Analógica OA4	1	\$1,890.00	\$1,890.00
	Modulo Entrada Digital IW8	1	\$1,343.00	\$1,343.00
	Modulo SALIDA DIGITAL OW8	1	\$504.00	\$504.00
	Fuente Monofásica 120-230 VAC	1	\$2,147.00	\$2,147.00
Cable	Cable Ethernet Industrial GP2X2	20	\$6.72	\$134.40
				\$31,009.00

CONCLUSIONES

PRIMERA: Luego de la investigación realizada en el proceso de evaporación de leche en la Planta de Gloria S.A. es que se determina el sistema de control de lazo cerrado soportado a través de un modelamiento del primer efecto del evaporador para controlar la estabilidad de la temperatura de la leche como balance total en el sistema. Este sistema se mantiene estable en el tiempo y genera la confiabilidad necesaria para poder realizar el proceso de evaporación correctamente.

SEGUNDA: Después de haber analizado el evaporador de 3 efectos de evaporación, se obtiene que la criticidad se genera directamente en el control de la temperatura, en donde el primer efecto presenta un ingreso de vapor mediante una válvula proporcional y está genera la temperatura de evaporación de la leche, posteriormente el proceso mantiene la temperatura en los dos efectos restantes por una distribución de acuerdo a diseño en función al flujo de leche y a la temperatura inicial del sistema, por lo que la estabilidad de la temperatura es muy importante en esta primera etapa.

TERCERA: Se determina que la instrumentación y equipos utilizados para el desarrollo del control fueron los correctos, no presentando variaciones en mediciones e inestabilidad en el sistema de evaporación, tales como RTDs, sensores de diferencial de presión, etc.

CUARTA: Las pruebas de funcionamiento concluyen que 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, esto se ve reflejado final en el proceso real obteniendo resultados positivos.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda que la computadora de operación donde se implemente el sistema SCADA de control, este protegido por nivel de autorización mediante contraseñas para evitar cualquier cambio no planificado.

SEGUNDA: Para la implementación del sistema de control del proceso, se propone realizar un estudio de señales y de electrónica para sincronizar los equipos usados para el adecuado funcionamiento de los mismos.

TERCERA: Es recomendable no superar la temperatura de 65°C en el primer efecto del evaporador, debido a que las proteínas en la leche se degradan y se queman causando obstrucción en las tuberías de la calandria ocasionando inestabilidad en el proceso.

CUARTA: Se propone que para un análisis económico más preciso se incluyan los costos de operación para determinar el tiempo de retorno así como para obtener el punto de equilibrio de la inversión.

GLOSARIO

- **PLC**

Dispositivo Lógico Programable

- **Calandria**

Consiste en un haz de tubos vertical, corto, usualmente de no más de 6" de altura, colocado entre dos espejos que se remachan en las bridas del cuerpo del evaporador.

- **Convección natural**

Es el mecanismo transferencia de calor a través de un fluido con movimiento masivo de éste.

- **Deflectores**

Se utilizan para inducir turbulencia fuera de los tubos, es costumbre emplear deflectores que hacen que el líquido fluya a través de la coraza a ángulos rectos con el eje de los tubos.

- **Diagrama de Dühring**

Este diagrama indica que la temperatura de ebullición de un líquido o disolución es una función lineal de la temperatura de ebullición de una sustancia de referencia, normalmente es el agua pura

- **Evaporación**

La evaporación consiste en la adición de calor a una solución para evaporar el disolvente que, por lo general, es agua.

- **Evaporador**

Un evaporador es un intercambiador de calor capaz de hervir la solución y un dispositivo para separar la fase vapor del líquido en ebullición.

- **Intercambiador de calor**

Dispositivo diseñado para transferir calor de un fluido a otro los cuales se encuentran a diferentes temperaturas circulando en él, sea que estos estén separados o que se encuentren en contacto.

- **Lucetas**

Dispositivo utilizado para medir el nivel de líquido o concentrado en el Evaporador.

- **Trampa de Vapor**

Actúan por una diferencia de temperatura, entre el vapor y el condensado. Estas trampas poseen un elemento térmico (termostato) que se dilata con el calor del vapor y se contrae en presencia de condensado.

- **SAP ERP**

Es un Potente Sistema informático que administra los recursos de las principales empresas del mundo, brindando una gestión eficiente de los recursos financieros, recursos humanos, canales de ventas, procesos de logística, manejo de stock, etc.

SAP es un ERP, los Sistemas ERP (Enterprise Resource Planning) son sistemas desarrollados para administrar los recursos de una empresa, como ser su logística, sus recursos humanos, sus ventas, su producción industrial, sus finanzas, etc.

- **Módulo SAP Mantenimiento de Planta / SAP PM / SAP Plant Maintenance**

Se usa para la Planificación de tareas en planta, planificación de mantenimiento, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vagn Westergaard, Tecnología de la leche en Polvo Evaporación y Secado por Atomización, GEA NIRO A/S Copenhagen, Dinamarca, 2004.
2. Manual de industrias Lácteas 2DA Edición AMV ediciones Mundi-Prensa, Equipo Técnico de Alfa Laval Food Engineering AB, Suecia, 1990
3. Teoría y práctica de medición de niveles WIM van de Kamp, 23ª edición, España, 2008
4. Ciencia de la leche y tecnología de los productos lácteos, Department of food science, Marcel Dekker Inc, 2001
5. Kuo, Benjamín. C. Sistemas de Control Automático. 7a edición. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.

WEBGRAFIA

- [2] <http://www.hrs-heatexchangers.com/es/aplicaciones/evaporacion.aspxb>
- [3] <http://www.suggest-keywords.com/Y2FsYW5kcmlhIGV2YXBvcmlF0b3I/>
- [4] <http://www.balajithinfilm.com/fce.png>
- [5] http://www.diquima.upm.es/old_diquima/investigacion/proyectos/chevic/catalogo/CICLONES/imagenes/ciclon.gif
- [6] http://www.burnsengineering.com/local/uploads/files/Resistance_vs_Temperature_Tables_and_Usage.pdf
- [7] www.endress.com/itmp-tmt182
- [8] http://www.spiraxsarco.com/global/ar/Products/Documents/V%C3%A1lvulas_de_control_de_dos_v%C3%ADas_serie_LEA__LFA_y_L-Hoja_T%C3%A9cnica.pdf

[9]https://library.e.abb.com/public/3bd4ee70ba52d4f8c125765d0034e4e8/45_18-79-EN-C-10_2009.pdf

[10] <https://www.cipsistem.com/Fq-pumps.html>

[11] <http://www.endress.com/en/Field-instruments-overview/pressure/Differential-pressure-Deltabar-FMD78?highlight=fmd>

[12] ab.rockwellautomation.com/es/Drives/PowerFlex-40

[13] <http://www.fristam.com/es-es/bombasmezcladoras/bombascentr%C3%ADfugas/fpxelest%C3%A1ndardelaindustria.aspx>

[14] <http://blog.hunabsys.com/desarrollando-algoritmos-de-control-pid-parte-3/>

[15] <http://es.slideshare.net/123golondrinas/simulacion-controlprocesos>

[16] <http://plc-hmi-scadas.com/022.php>

[17] <http://www.ni.com/white-paper/13034/es/>

[18]http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1769-um011_-en-p.pdf

[19]https://portal.endress.com/wa001/dla/5000319/0453/000/07/TI00048DEN_1416.pdf

Fundamentos de evaporadores [En línea]

<http://www.che.ttu.edu/pcoc/publications/AICHE04/aiche04Pulp.pdf>

Ecuaciones y modelos de transferencia de calor en evaporadores [En línea]

<http://profdoc.um.ac.ir/articles/a/1014309.pdf>

Evaporadores de película descendente de GEA niro. [En línea]

http://www.niroinc.com/evaporators_crystallizers/dairy_falling_film_evapora

tors.a sp

Tecnología de evaporación, GEA [En línea]

[http://www.geape.com.cn/gpcn/cmsresources.nsf/filenames/Evaporation%20Technology.pdf/\\$file/Evaporation%20Technology.pdf](http://www.geape.com.cn/gpcn/cmsresources.nsf/filenames/Evaporation%20Technology.pdf/$file/Evaporation%20Technology.pdf)



ANEXOS

MANUAL CONFIGURACIÓN ALLEN BRADLEY

Voy a ir redactando una serie de entradas con mis avances y, aunque todo lo que escriba lo habré probado previamente, es posible que cometa errores e imprecisiones.

El PLC en concreto con el que voy a hacer pruebas es un **CompactLogix L32E**, acompañado de una fuente de alimentación y una tarjeta de 16 salidas digitales, más la correspondiente tapa de final de bus. El PLC conectado y funcionando sobre mí mesa tiene el siguiente aspecto:

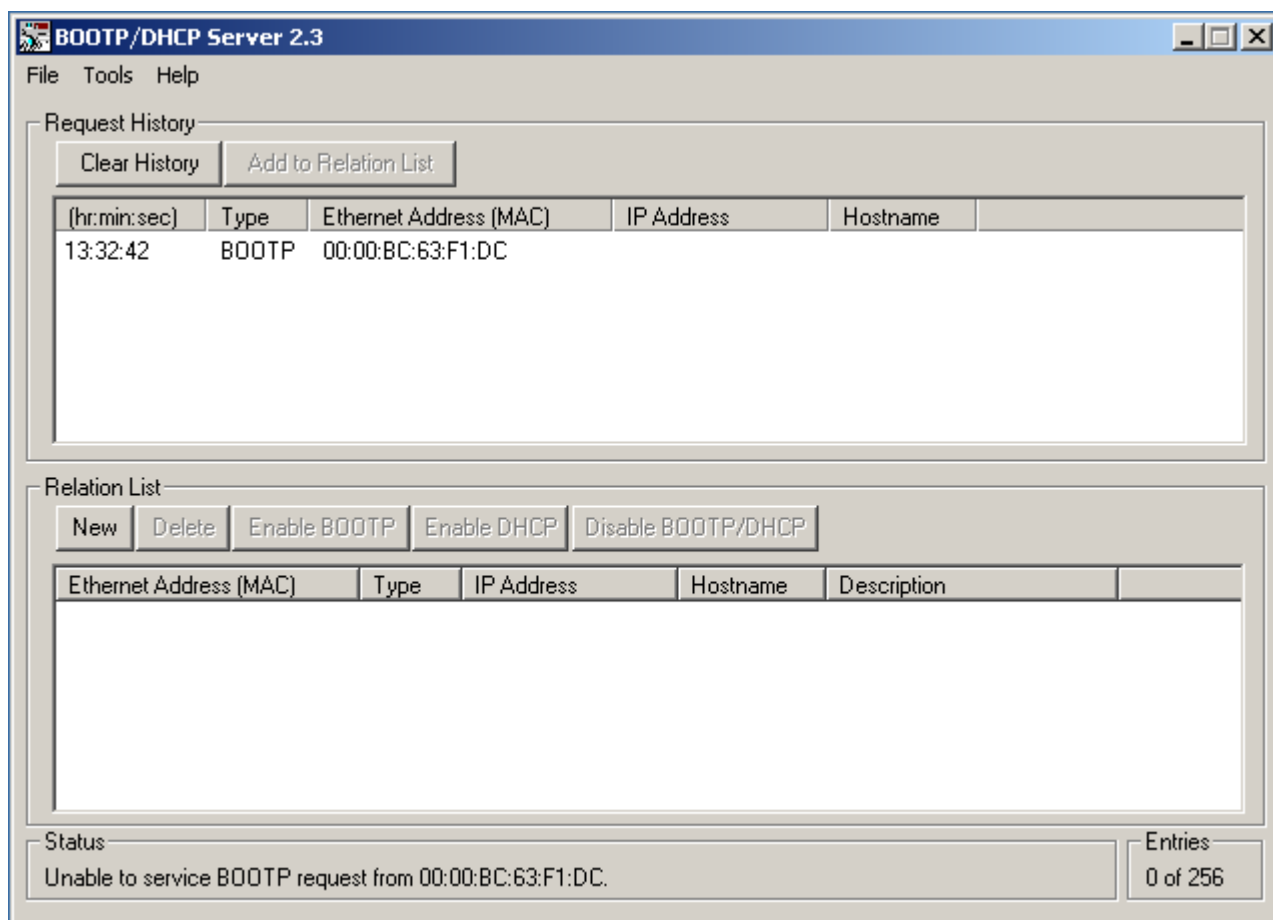


Como características más destacadas decir que tiene 750 kb de memoria de usuario, una ranura para Compact Flash, un puerto de comunicaciones serie

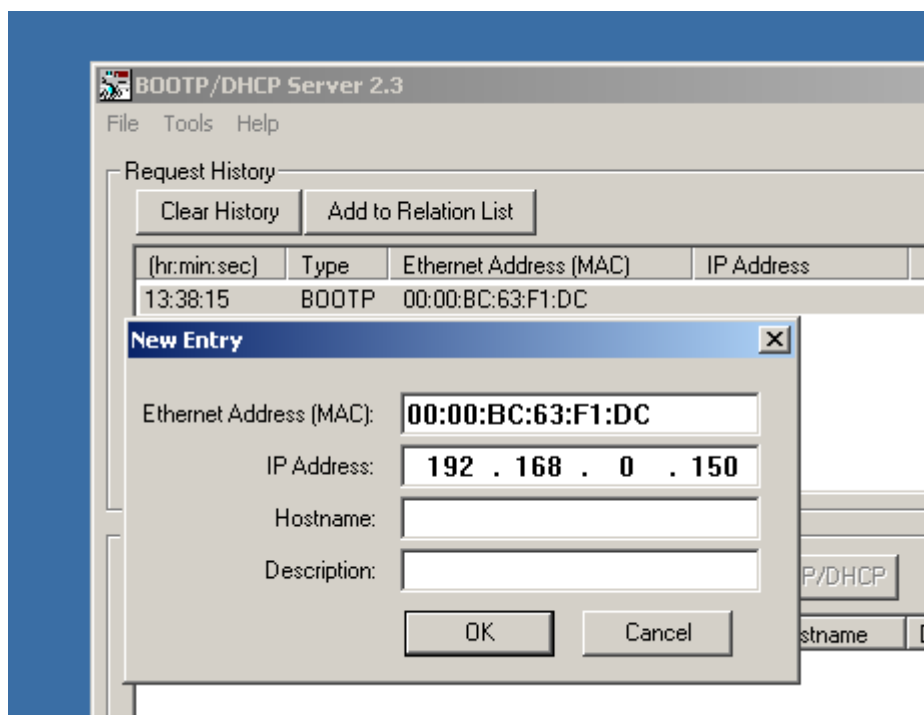
y un puerto ethernet. Puede expandirse con un máximo de 16 módulos. Tienes las características detalladas en la página de Rockwell (PDF).

Como el cliente para el que está destinado el PLC tiene estandarizadas versiones de software antiguas, voy a utilizar una máquina virtual con Windows 2000 donde voy a instalar todos los programas: RSLogix 5000 (programación de PLC), RS View ME (programación de HMI), RSNetWorx (configuración de redes) y RSLinx (gestión de comunicaciones). Todo esto montado sobre VMWare. Aprovechando que tengo varias máquinas con Virtual Box, he preparado una máquina virtual con esta última, funcionando también correctamente. Para tener comunicación a través del puerto ethernet simplemente hay que tener la precaución de poner el puerto ethernet virtual en modo puente (*bridge*) y asignar en el Windows 2000 una dirección IP y máscara coherentes con nuestra red (la primera vez tuve que reiniciar tanto mi máquina virtual como mi ordenador para que funcionase).

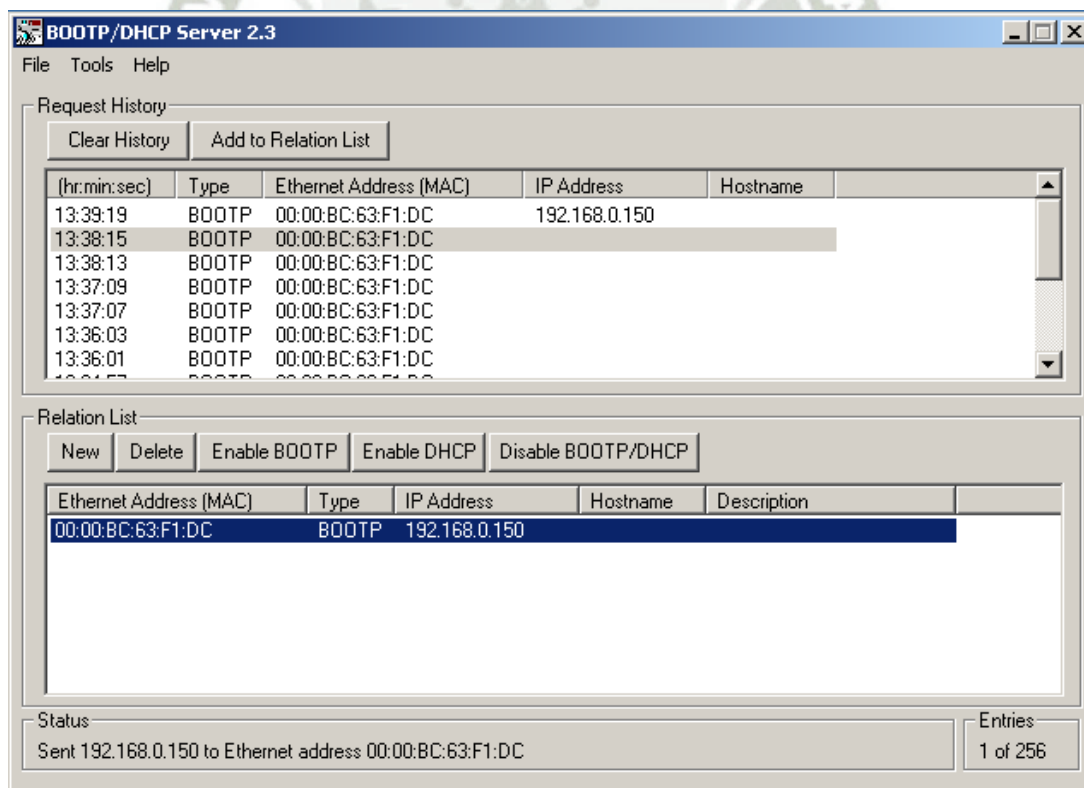
El PLC CompactLogix L32E viene de fábrica con IP dinámica. Para poder realizar una comunicación con el *RSLogix 5000* tiene que tener asignada una IP fija. Para asignarle esta IP fija podemos conectarnos a través del puerto serie o, como haré yo, a través del puerto ethernet. Para esta última opción Rockwell suministra la aplicación *BOOTP/DHCP Server*, que busca en la red dispositivos para poder direccionarlos. En menos de un minuto, si el PLC está conectado correctamente a nuestra red, el *BOOTP/DHCP Server* delatará su presencia mostrando su dirección MAC.



Si hacemos doble clic sobre el dispositivo detectado podremos asignarle una dirección IP (que tiene que ser coherente con la configuración de nuestra red).

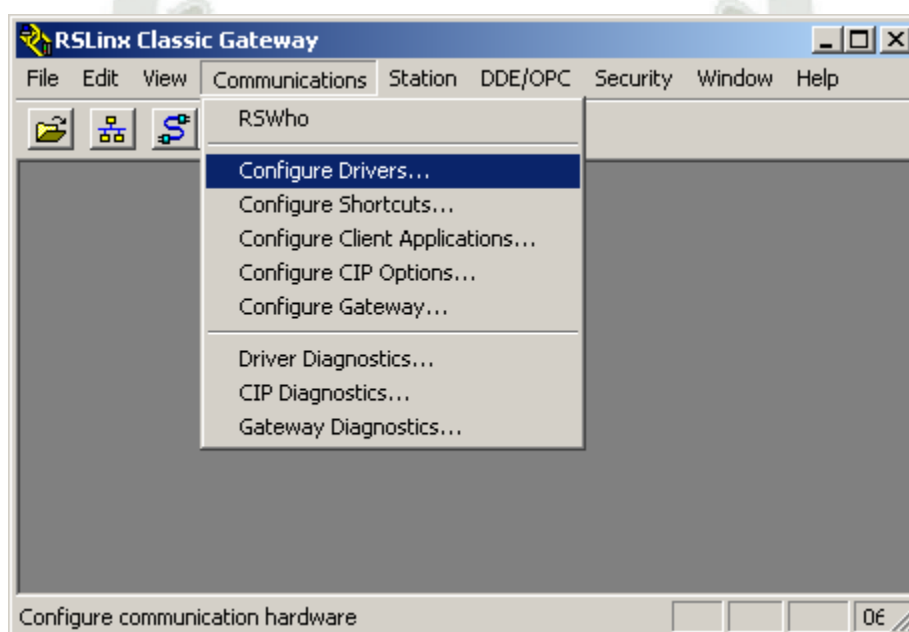


Al cabo de unos segundos deberá ya aparecer nuestro PLC con la dirección IP asignada.

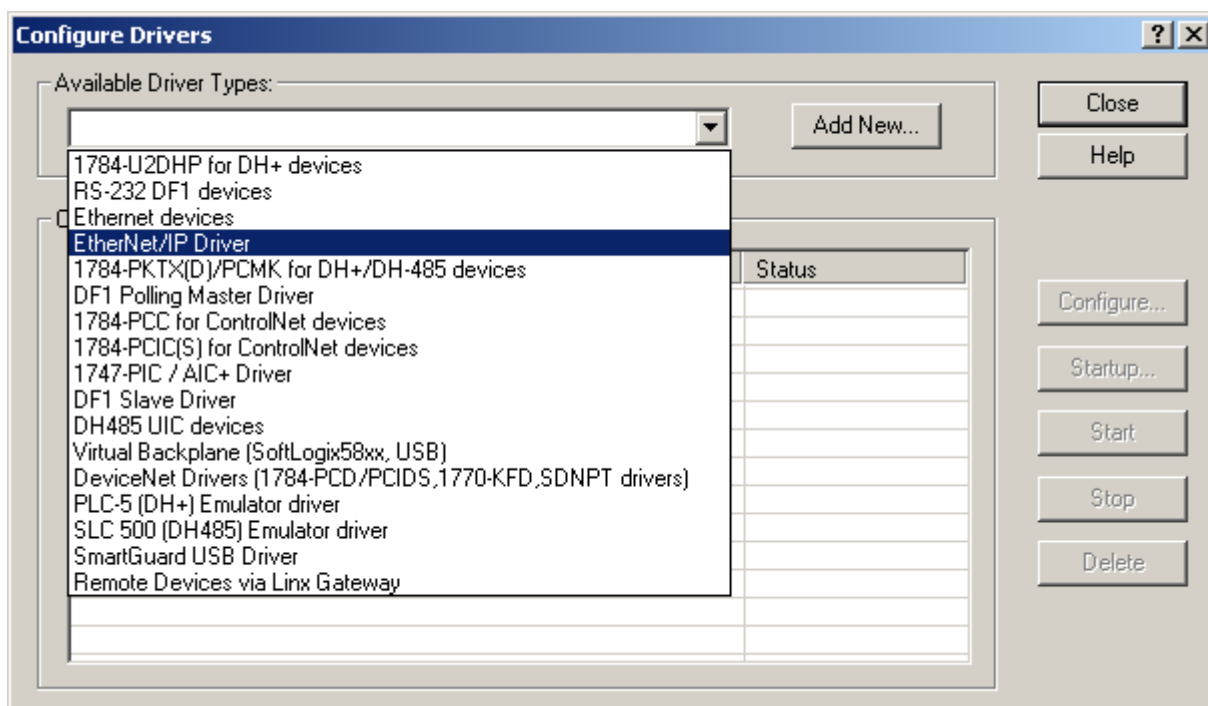


En mi caso me conecto al PLC a través de un switch, pero me podría conectar directamente con un cable ethernet cruzado.

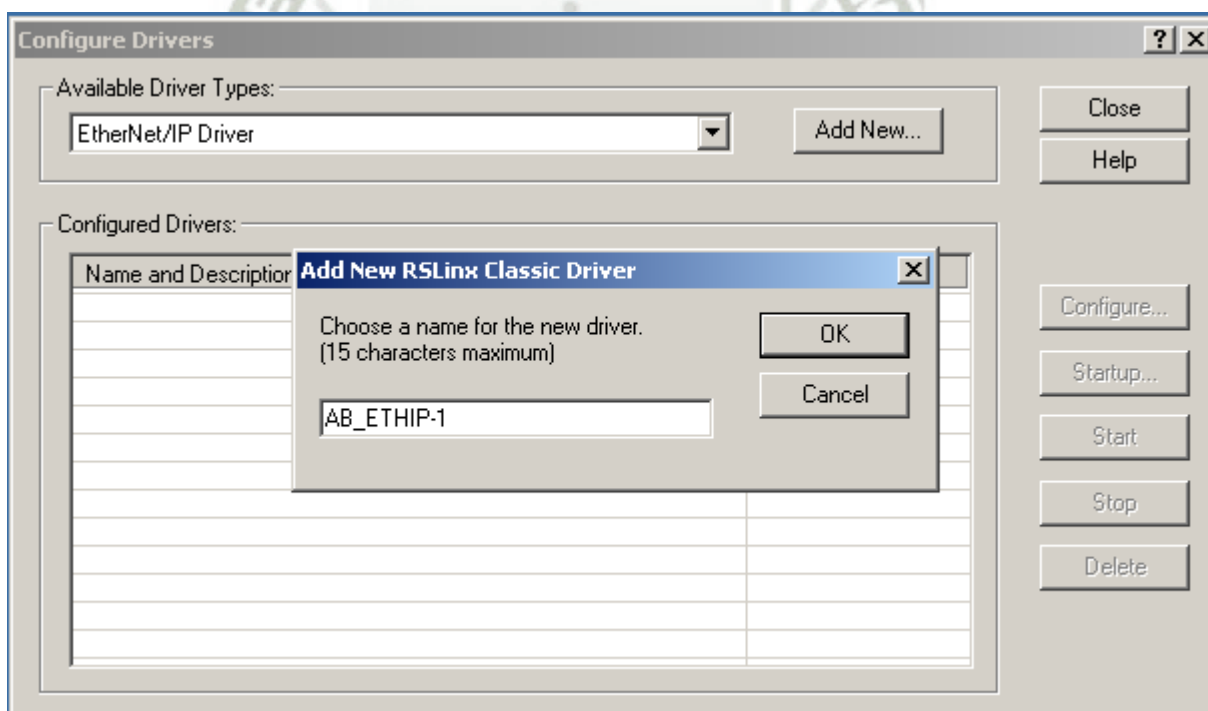
Cerramos el *BOOTP/DHCP Server* pues ya no lo necesitaremos más. Ahora vamos a abrir el *RSLink*. Lo primero que deberemos hacer es configurar los controladores (drivers) para comunicarnos con el PLC. Para ello vamos *Communications -> Configure drivers...*



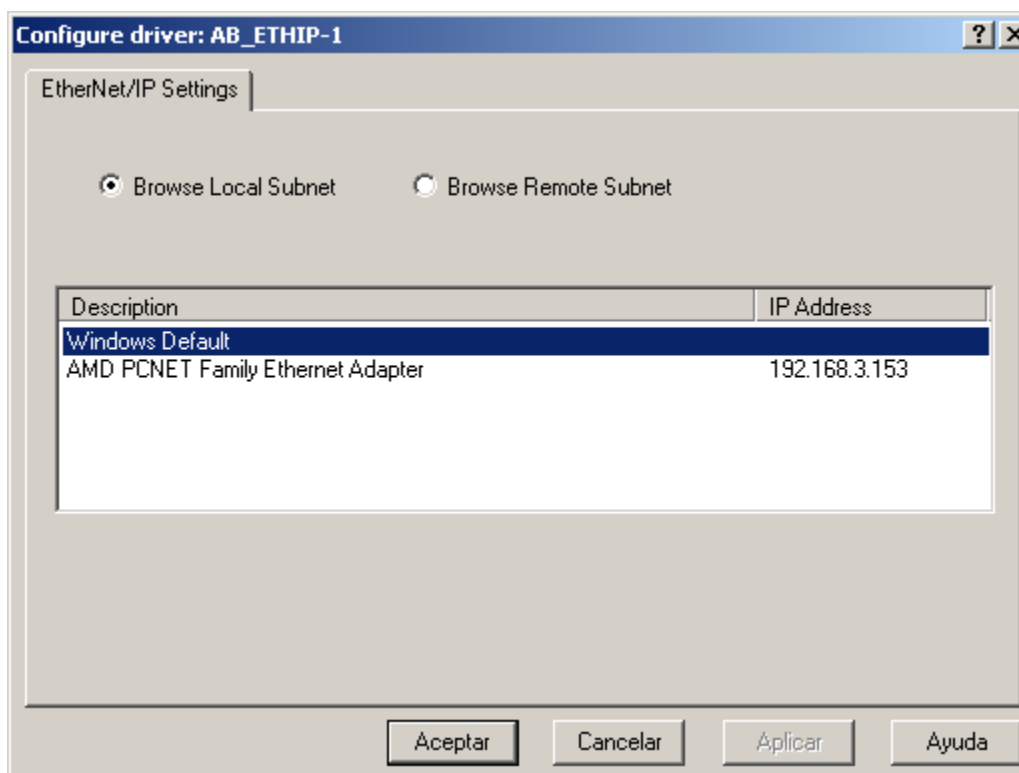
En el menú desplegable seleccionamos *EtherNet/IP Driver*.



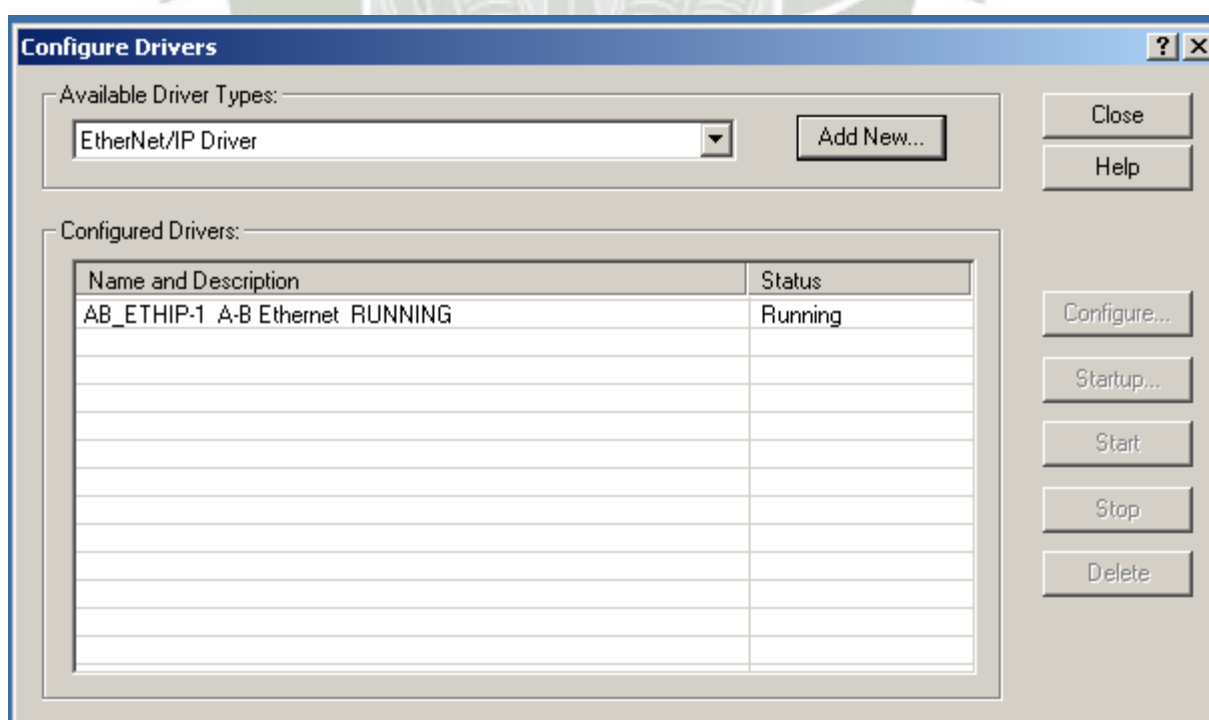
Al pulsar sobre *Add New...* nos pedirá un nombre para el controlador.



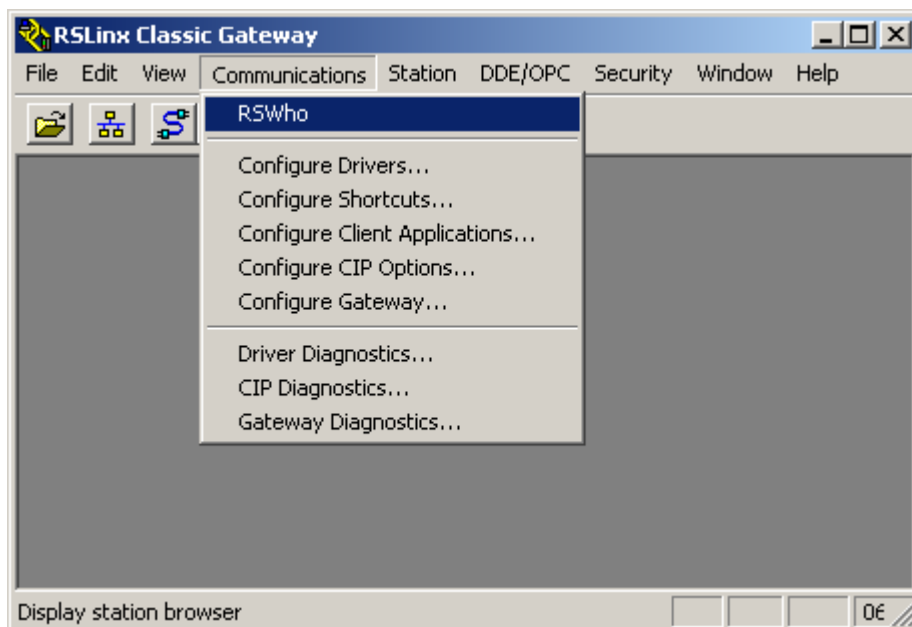
Al aceptar nos preguntará por qué adaptador de red se hará la comunicación, en mi caso deajo seleccionado *Windows Default*.



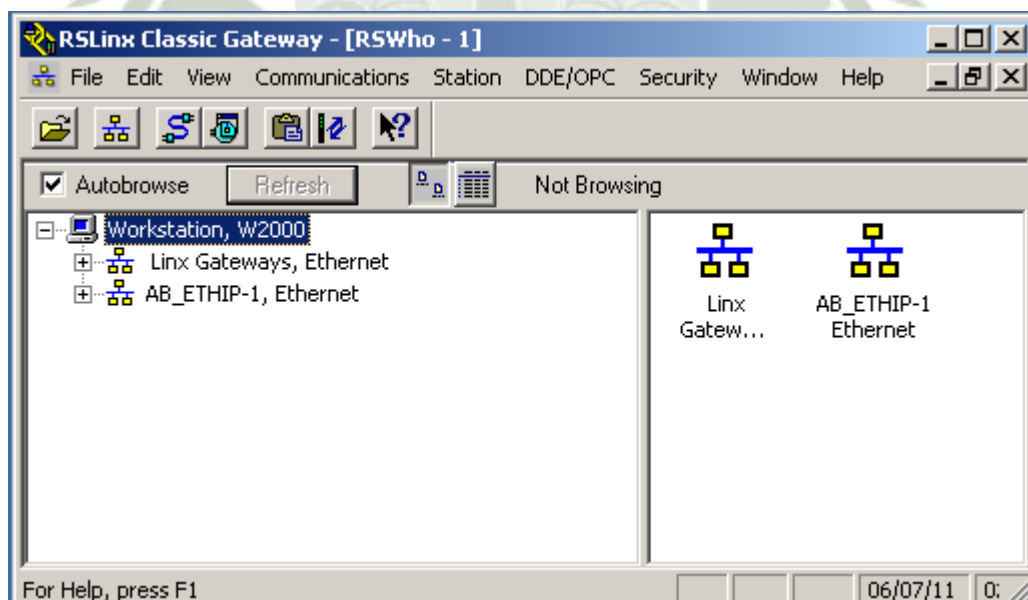
Aceptando nuevamente deberemos tener nuestro controlador funcionando (*Running*).



Cerramos la ventana de configuración de controladores y vamos a ver si tenemos comunicación con el PLC. Para ello vamos al menú *Communications* -> *RSWho*

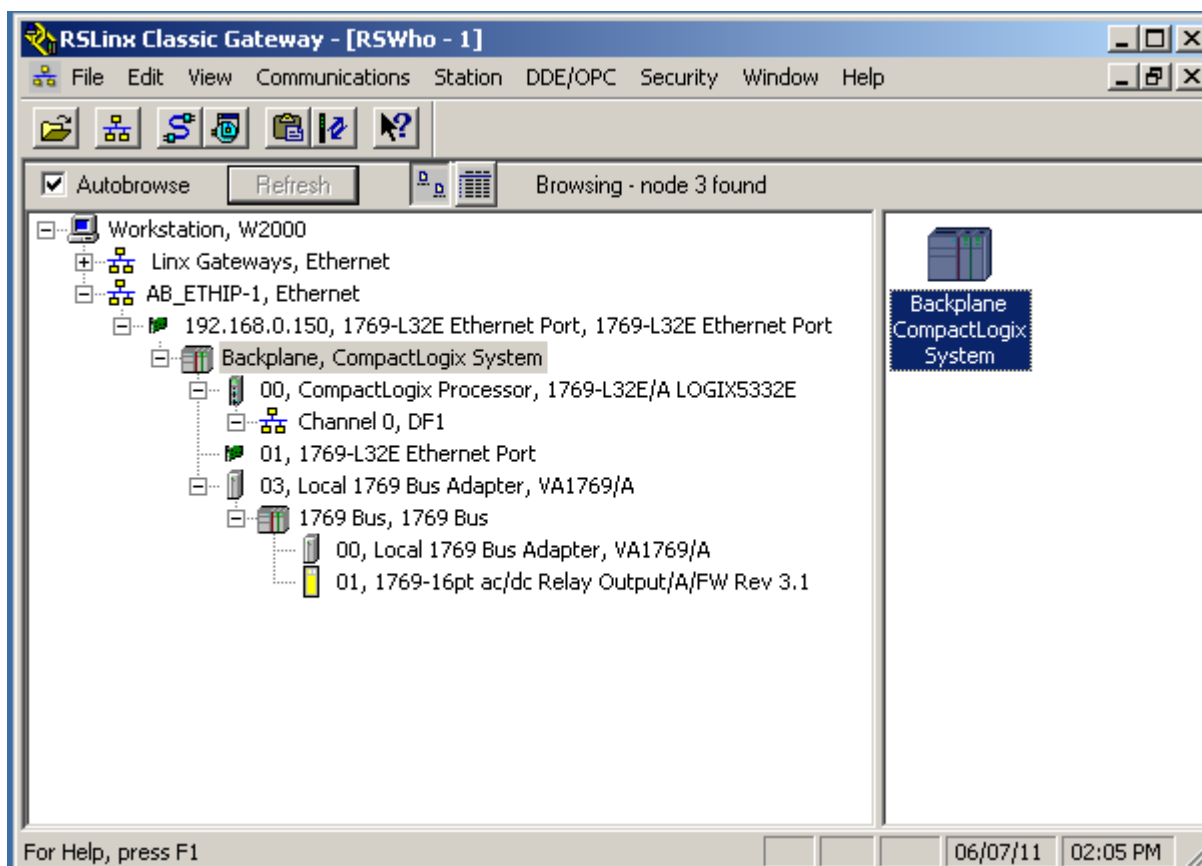


Y vemos que figura el controlador *AB_ETHIP-1* que acabamos de configurar.

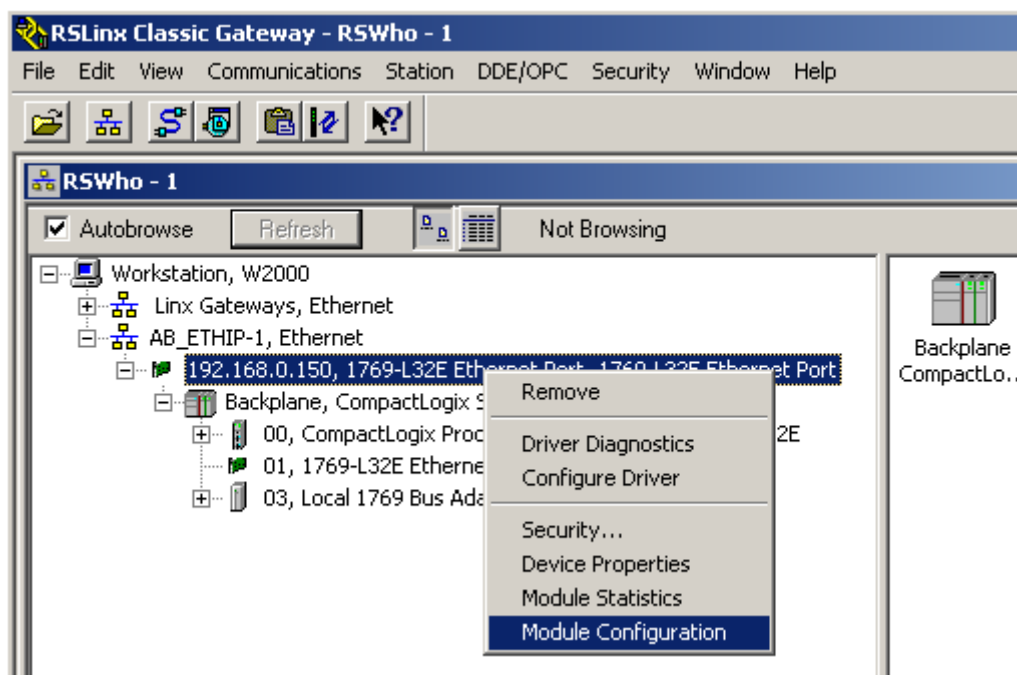


Pulsamos sobre el controlador y veremos cómo empieza a parpadear su

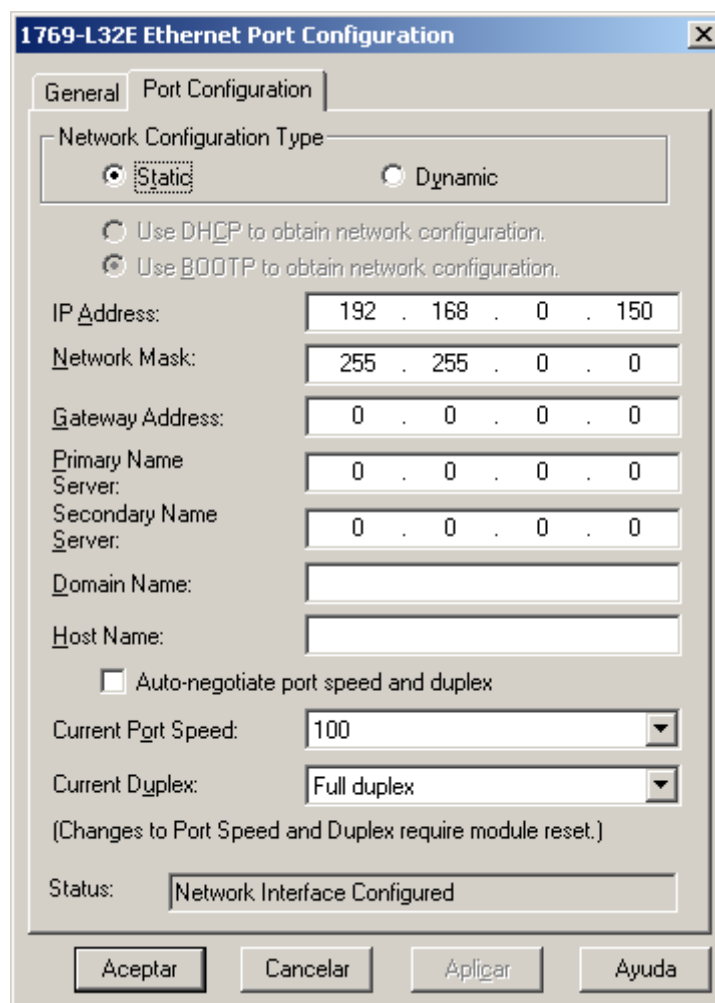
icono, señal de que está buscando dispositivos. En breve deberá aparecer nuestro PLC y todos los puertos y tarjetas que tengamos conectados.



Ahora pulsamos el botón derecho del ratón sobre el puerto ethernet del PLC y vamos a *Module Configuration*.



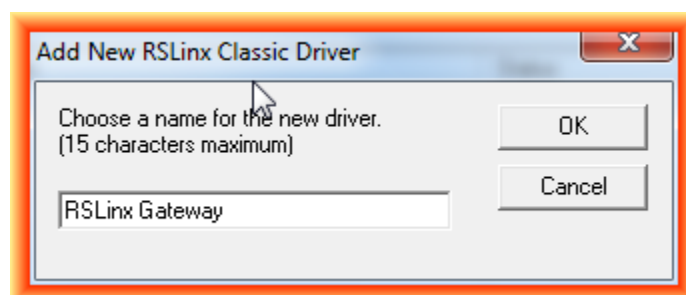
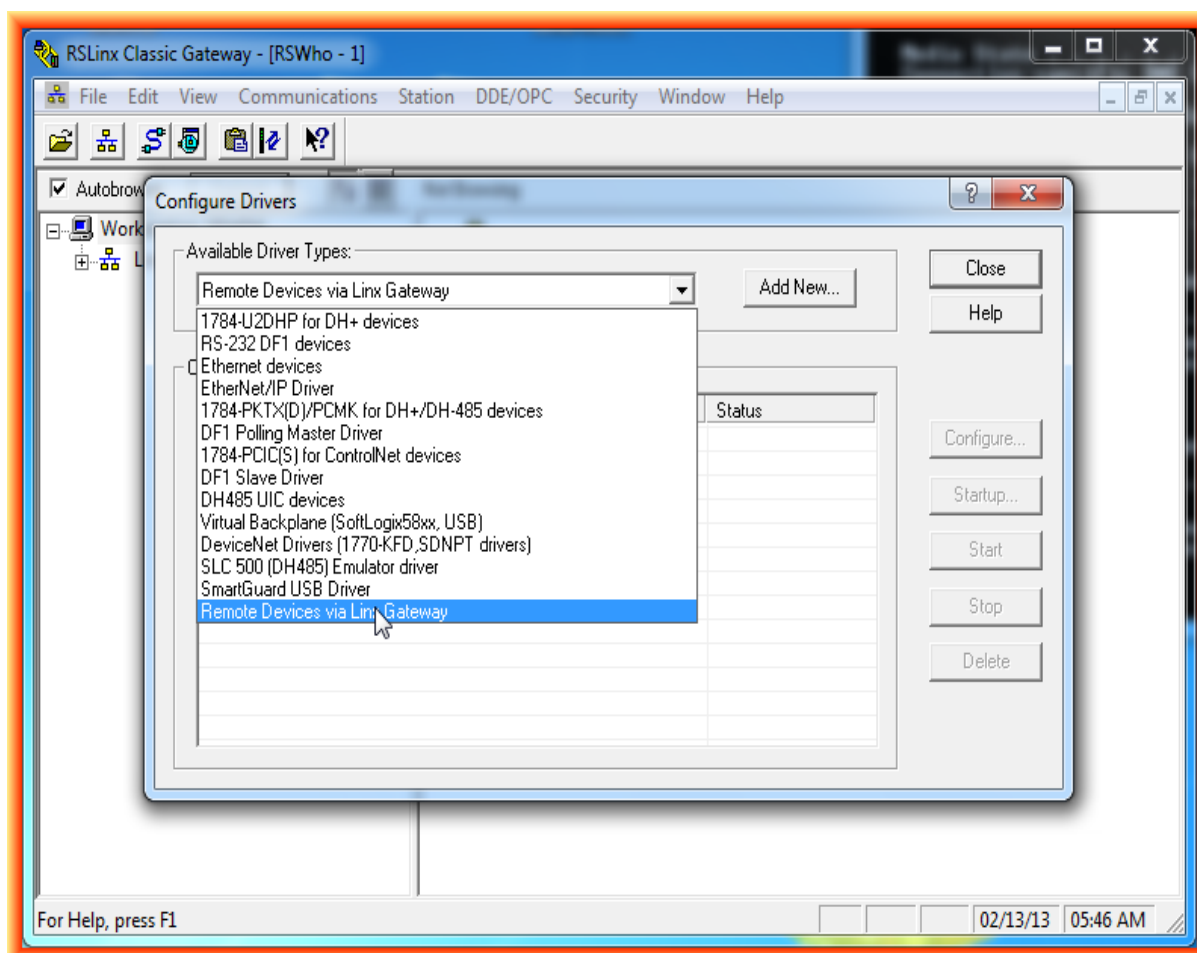
Y en la pestaña *Port Configuration* nos aseguramos que esté marcada la opción *Static*, para que no pierda la dirección IP cuando apaguemos el PLC, y además podremos modificar la IP y la máscara de red.

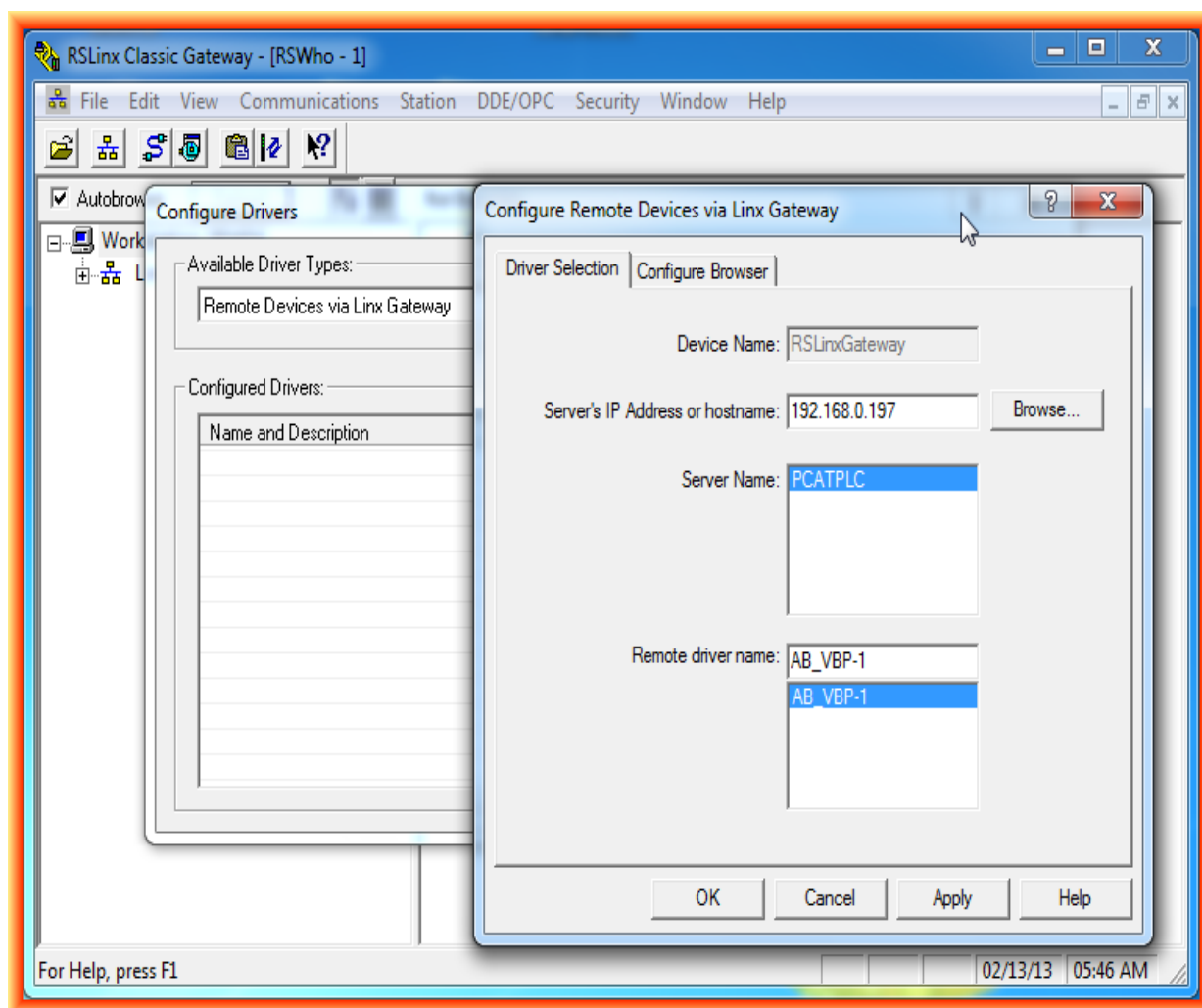


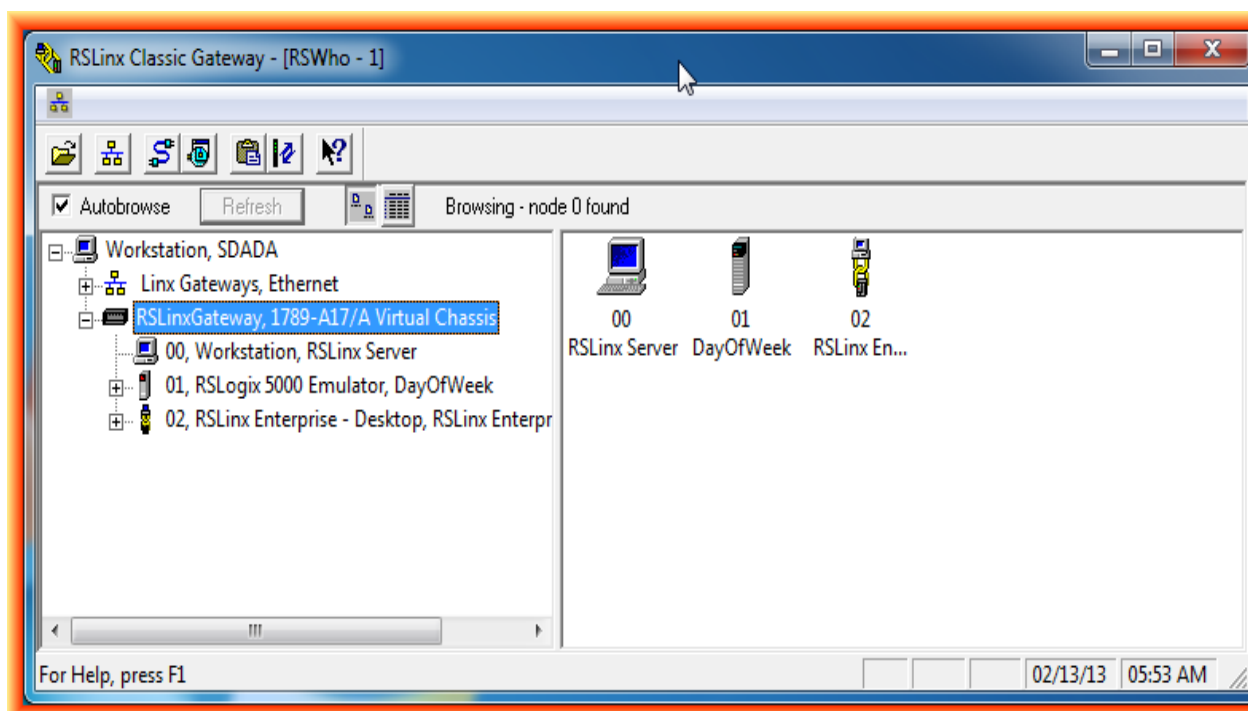
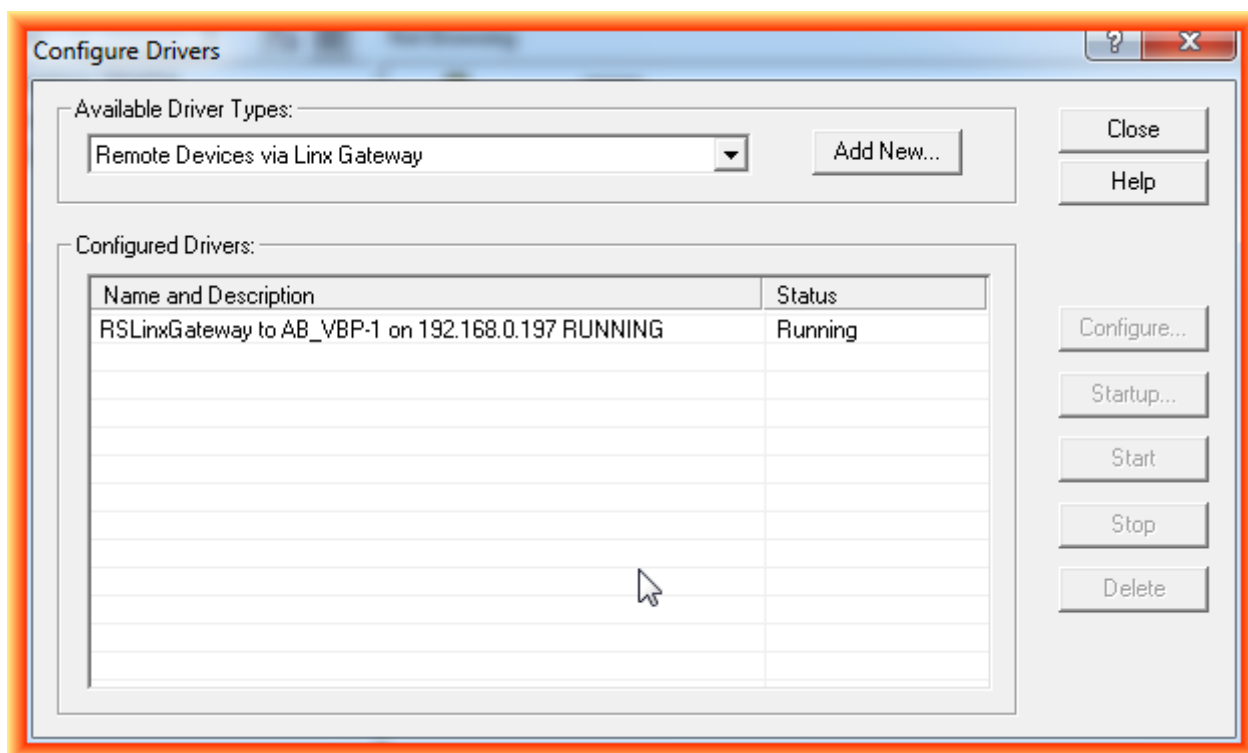
Y listo, ya tenemos nuestro PLC configurado y comunicando para empezar a trastear con él.

Configuración del Driver Remote Device Linx Gateway

Vamos a configurar el driver Remote device Linx Gateway, los requisitos son los siguientes: disponer de la versión Gateway del RSLinx y que ambos equipos esten en el mismo grupo de trabajo, este driver lo vamos a utilizar para acceder desde un PC a los dispositivos que hay en otro PC que hace la función de Gateway, siguiendo la explicación se trata de acceder al RSLogix Emulate 5000 desde el PC donde en la práctica siguiente estará el Factory Talk View Machine Edition simulando una HMI un Panel View Plus.







Comunicación entre Intouch y RSLogix Emulate 5000 a través del FSGateway

Vamos a comunicar Intouch con RSLogix Emulate 5000 a través del FSGateway que a su vez enlaza con la Configuración del RSLinx como servidor OPC. Podría ser una configuración real si se sustituye el RSLogix Emulate 5000 con nuestro PLC.

1.- Iniciamos nuestro proyecto en Intouch y añadimos un nuevo Access Name, Application Name es FSGateway y el tópico es el configurado en la práctica FSGateway



2.- Una vez creado el Access Name, vamos a añadir los items (variables), seleccionamos su correspondiente Access Name y utilizaremos el uso del nombre del tag como nombre del item (variable)

Tagname Dictionary

☐ Main
 ☒ Details
 ☐ Alarms
 ☐ Details & Alarms
 ☐ Members

New Restore Delete Save << Select... >> Cancel Close

Tagname: Entrada1 Type: ... I/O Discrete

Group: ... \$System ☐ Read only ☒ Read Write

Comment: AccessLevel

☐ Log Data ☐ Log Events ☐ Retentive Value

Initial Value ☐ On ☒ Off
 Input Conversion ☒ Direct ☐ Reverse
 On Msg: Off Msg:

Access Name: ... RSLogixEmulate

Item: Entrada1 ☒ Use Tagname as Item Name

Select Tag

Tagname	Tag Type	Access Name	Alarm Group	Comment
Entrada1	I/O Discrete	RSLogixEmulate	\$System	AccessLevel
Entrada2	I/O Discrete	RSLogixEmulate	\$System	AccessLevel
JMessage	Memory Message	RSLogixEmulate	\$System	AccessLevel
Salida1	I/O Discrete	RSLogixEmulate	\$System	AccessLevel
Salida2	I/O Discrete	RSLogixEmulate	\$System	AccessLevel
Temporizador1ACC	I/O Real	RSLogixEmulate	\$System	AccessLevel
Temporizador2ACC	I/O Real	RSLogixEmulate	\$System	AccessLevel

Console (NOTEBOOK)\DAServer Manager\Default Group\Local\Archestra.FSGateway.1\Config

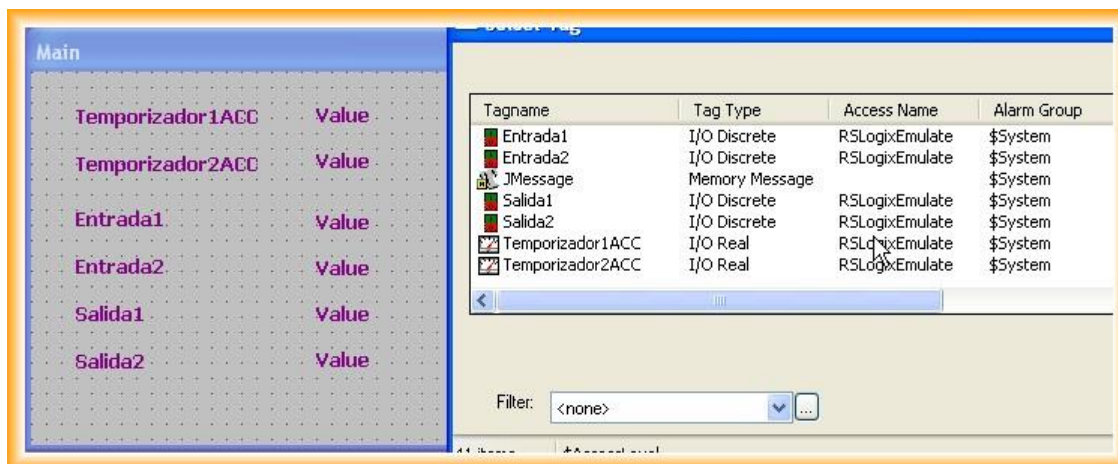
Node Type: OPCGroup Delimiter: .

MyWeb Parameters Device Items

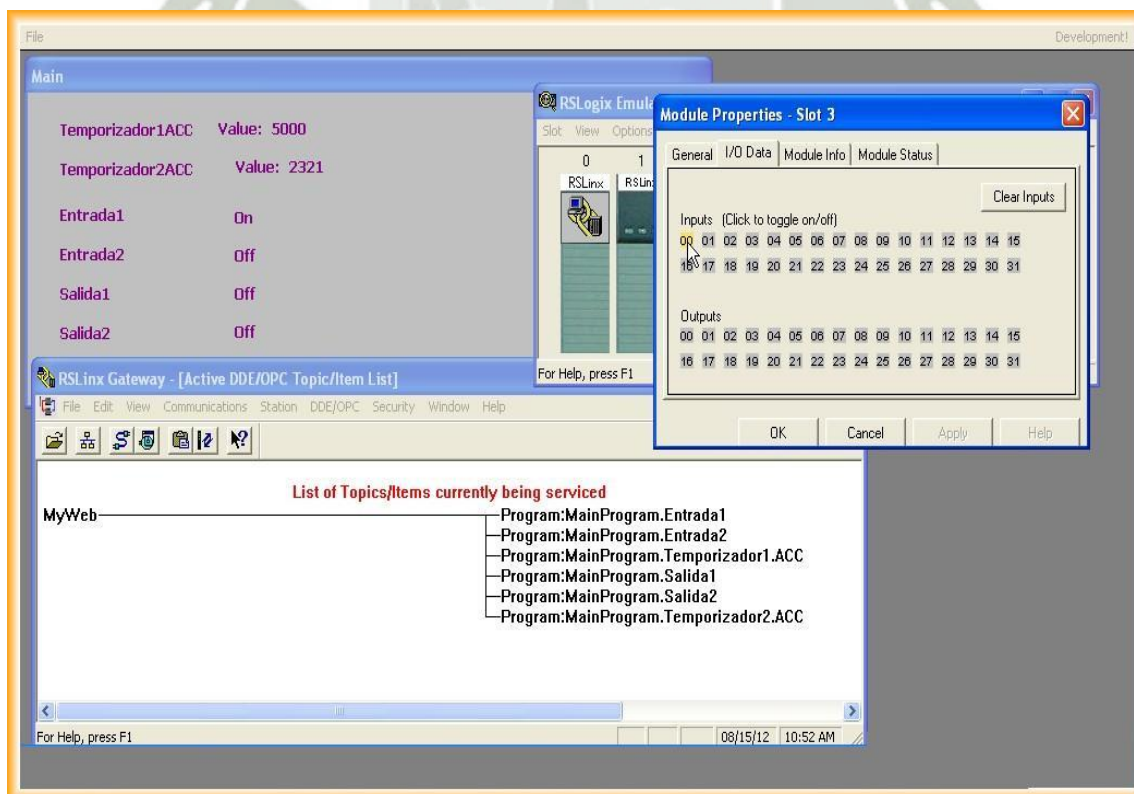
Name	Item Reference
Entrada1	[MyWeb]Program:MainProgram.Entrada1
Entrada2	[MyWeb]Program:MainProgram.Entrada2
Salida1	[MyWeb]Program:MainProgram.Salida1
Salida2	[MyWeb]Program:MainProgram.Salida2
Temporizador1ACC	[MyWeb]Program:MainProgram.Temporizador1....
Temporizador1PRE	[MyWeb]Program:MainProgram.Temporizador1....
Temporizador2ACC	[MyWeb]Program:MainProgram.Temporizador2....
Temporizador2PRE	[MyWeb]Program:MainProgram.Temporizador2....

3.- Utilizaremos los nombres que dimos cuando se configuro los Items en la configuración del FSGateway, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

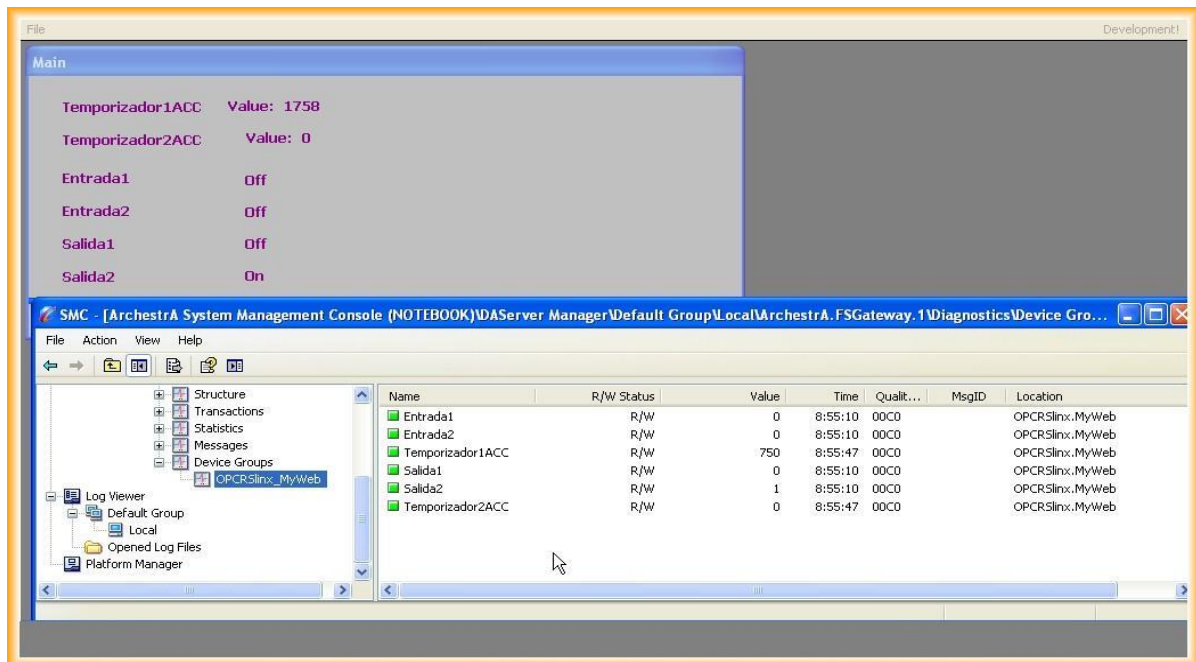
4.- Ahora configuramos todas nuestras pantallas, en este ejemplo vamos a visualizar los valores de las variables y algún pulsador



5.- Ya podemos ejecutar nuestro Runtime y observar los resultados, hacemos uso del simulador para forzar las entradas, también se puede comprobar como el RSLinx esta activo y los items que esta sirviendo.



6.- A su vez, también podemos comprobar como nuestro FSGateway esta funcionando correctamente y los items que tiene configurados



7.- En la siguiente imagen he añadido unos leds para su mejor visualización y un pulsador con la función Toogle, pero si ejecuto la entrada con el botón aunque en el Scada queda reflejado que esta activada la entrada, no es así. Y se observa el simulador y el programa online se puede ver como el valor no se fuerza, lo ideal es hacer uso del simulador para forzar las entradas

