

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería en Electrónica



CoopeAgri El General R.L.

Ingenio CoopeAgri



Implementación de un sistema de control electrónico para mejorar la eficiencia del área de evaporadores.

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

Oلمان Guzmán Ramírez

Cartago, Junio del 2006

ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR



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

Miembros del Tribunal

Ing. William Marín Moreno

Profesor lector

Ing. Néstor Hernández Hostaller

Profesor lector

Ing. Sergio Morales Hernández

Profesor asesor



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

Cartago, 30 de mayo del 2006

Resumen

La globalización y el constante aumento de la competencia entre las empresas, hacen de la eficiencia un factor muy importante a la hora de evaluar la calidad de los procesos productivos, es aquí donde la automatización electromecánica contribuye. Con la introducción de las computadoras y la micro-electrónica se logra a través del manejo de la información la transformación de los mecanismos de producción.

El proceso de producción de azúcar se divide en varias etapas, entre las principales se encuentran: recepción, molienda, clarificación, evaporación, cocimiento y cristalización, centrifugación, secado y empaque. Anteriormente el control de los evaporadores del Ingenio CoopeAgri se efectuaba en forma completamente manual mediante pruebas de densidad realizadas en laboratorio y manipulación de válvulas mecánicas, logrando un control deficiente sobre el proceso.

Para mejorar la eficiencia en la evaporación era necesaria la instalación de un sistema automático capaz de controlar en forma estricta las principales variables involucradas en el desarrollo de la actividad. Para el diseño de la estrategia de control y la selección de los transmisores se realizó un análisis de las condiciones térmicas y químicas del proceso, la posible ubicación de los equipos de campo (transmisores y válvulas) y de control (computadora y PLC) además de las condiciones operativas (ubicación del cuarto de control y del personal a cargo de la supervisión).

Con el sistema de control automático implementado se logró mejorar la eficiencia en la evaporación mediante el control de cuatro variables muy importantes del proceso, el flujo de jugo claro de entrada, el nivel de jugo en las calandrias de los pre-evaporadores, la presión del vapor de escape y la densidad de la meladura del último efecto, logrando reducir las paradas por lleno en evaporadores en relación a la zafra anterior. De esta forma desde una computadora el operador puede monitorear las condiciones de operación y ajustar los parámetros para un adecuado funcionamiento del proceso.

Palabras clave: Eficiencia; Automatización; Evaporadores; Azúcar; Ingenio CoopeAgri; Monitorear.

Abstract

The globalization and the constant increase of the competition between the companies, they make of the efficiency a very important factor when evaluating the quality of the productive processes, it is here where the electromechanical automation contributes. With the introduction of the computers and the micro-electronic ones is achieved through the handling of the information the transformation of the production mechanisms.

The process of production of sugar is divided in several stages, some of the main ones they are: reception, mill, clarification, evaporation, cook and crystallization, centrifugation, drying and packing. Previously the control of the evaporation area of the Ingenio CoopeAgri was made in totally manual form by means of tests of density carried out in laboratory and manipulation of mechanical valves, achieving a faulty control on the process.

To improve the efficiency in the evaporation it was necessary the installation of an automatic system able to control in strict form the main variables involved in the development of the activity. For the design of the control strategy and the selection of the transmitters an analysis of the thermal and chemical conditions of the process was carried out, the possible location of the field instruments (transmitters and valves) and of control (computer and PLC) besides the operative conditions (location of the control room and of the personnel in charge of the supervision).

With the system of automatic control implemented it was possible to improve the efficiency in the evaporation by means of the control of four very important variables of the process, the flow of clear juice of entrance, the level of juice in the larks of the pre-evaporated, the pressure of the escape vapor and the syrup brix of the last effect, being able to reduce the stops for full in evaporation area in relation to the previous harvest. This way from a computer the operator can visualize the operation conditions and to adjust the parameters for an appropriate operation of the process.

Keywords: Efficiency; Automation; Evaporated; Sugar; Ingenio CoopeAgri; Visualize.

Dedicatoria

Después de años de esfuerzo y sacrificio...

...puedo decir que he culminado una etapa sumamente importante de mi vida y deseo dedicarla:

A mis padres Marina Ramírez Campos y Moises Guzmán Chaves por la confianza brindada y su apoyo incondicional.

A mis hermanos y hermanas por sus consejos, su ayuda y su comprensión.

Ya que gracias al sacrificio realizado pudieron brindarme la oportunidad de asistir a la universidad y lograr obtener un título profesional.

A todos les estaré por siempre agradecido.

Agradecimiento

Deseo brindar el más sincero de los agradecimientos:

De manera muy especial a Dios por la familia maravillosa que tengo y por proporcionarme salud y fortaleza para luchar y salir adelante.

A CoopeAgri El General R.L, especialmente al Lic. Rolando Delgado gerente del Ingenio CoopeAgri por brindarme la oportunidad de realizar el proyecto de graduación en la empresa y al Ing. Víctor Vargas por su asesoría y apoyo durante el desarrollo del proyecto.

Al profesor Ing. Sergio Morales por la asesoría brindada durante la realización del proyecto.

A mis compañeros y compañeras de la universidad por su amistad y la ayuda otorgada durante la realización de mis estudios.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN.	11
1.1 Proceso Productivo.	11
1.3 Problema existente e importancia de su solución.	15
1.4 Meta y objetivos.	18
1.4.1 Meta.	18
1.4.2 Objetivo general.	18
1.4.3 Objetivos específicos.	18
2. ANTECEDENTES	20
2.1 Estudio del problema a resolver.	20
2.1.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar.	20
2.1.2 Características operativas.	23
2.2 Requerimientos de la empresa.	24
2.3 Propuestas de solución.	25
3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.	33
3.1 Cronograma de actividades.	33
3.2 Descripción de las actividades.	34
4. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE UTILIZADO.	39
4.1 Descripción general.	39
4.2 PLC (LC-700).	41
4.2.1 Descripción general.	41
4.2.2 Comunicación.	43
4.2.3 Configuración.	44
4.3 Computadora.	45
4.3.1 Descripción general.	45
4.3.2 Comunicación.	46
4.4 Transmisor de nivel por radar de onda guiada (BM-102).	46
4.4.1 Descripción general.	46
4.4.2 Calibración.	49
4.4.3 Comunicación.	52
4.5 Transmisor de densidad (DT301I-1IS-101-51).	52
4.5.1 Descripción general.	52
4.5.2 Calibración.	55
4.5.3 Comunicación.	55
4.6 Transmisor de flujo (Optiflux1000).	56
4.6.1 Descripción general.	56
4.6.2 Calibración.	58
4.6.3 Comunicación.	58
4.7 Transmisor de nivel (LD301L).	58
4.7.1 Descripción general.	58
4.7.2 Calibración.	60
4.7.3 Comunicación.	60
4.8 Transmisores de presión (LD291).	61

4.8.1	Descripción general.....	61
4.8.2	Calibración.	62
4.8.3	Comunicación.....	62
4.9	Válvulas para control.....	63
4.10	Transmisor de pH (873APH).....	64
4.10.1	Descripción general.....	64
4.10.2	Calibración.	66
4.10.3	Comunicación.....	66
4.11	Transmisor de temperatura (TT421).....	67
4.11.1	Descripción general.....	67
4.11.2	Calibración.	68
4.11.3	Comunicación.....	68
5	DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO.	69
5.1	Configuración del PLC.....	69
5.1.1	Aspectos generales.....	69
5.1.2	Lazo de control de Brix de meladura.....	73
5.1.3	Lazo de control de nivel de pre-evaporadores.	74
5.1.4	Lazo de control de flujo de jugo claro.....	75
5.1.5	Lazo de control de vapor de relleno.	76
5.1.6	Lazo para control de temperatura de meladura.	77
5.1.7	Alarmas de proceso.	78
5.1.8	Totalizadores.....	80
5.2	Interfaz gráfica con el usuario.	81
5.2.1	Descripción general.....	81
5.2.2	Pantalla principal.	81
5.2.3	Despliegue de variables.....	85
5.2.4	Curvas de proceso.	86
5.2.5	Parámetros de operación.....	87
5.2.6	Controles manuales.	88
5.3	Reporte de históricos.....	89
5.4	Software de enlace entre el PLC y la PC.	92
6	ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	95
6.1	Análisis del diseño del sistema de control.....	95
6.1.1	Análisis del hardware.	95
6.1.2	Análisis del software.....	100
6.2	Alcances y limitaciones.	105
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
7.1	Conclusiones.....	106
7.2	Recomendaciones generales.	107
7.3	Recomendaciones en materia de seguridad industrial.....	108
	BIBLIOGRAFÍA.....	109
	APÉNDICES.....	111
A.1	Descripción de la empresa.	111
A.1.1	Historia.....	111
A.1.2	Estructura política.	112

A.1.3 Estructura administrativa	113
A.2 Glosario y abreviaturas.....	117
A.2.1 Glosario.....	117
A.2.2 Abreviaturas.....	117
ANEXOS.....	118
B.1 Datos técnicos del sensor de densidad DT301.....	118
B.2 Datos técnicos del sensor de nivel BM 102	120
B.3 Datos técnicos del transmisor de nivel LD301	123
B.4 Datos técnicos del PLC modelo LC 700.....	125
B.5 Datos técnicos del transmisor de flujo (Optiflux 1000).....	128
B.6 Datos técnicos de los transmisores de presión (LD291).....	131

Índice de Figuras

Figura 1.1	Diagrama del proceso de elaboración de azúcar [Ref. 13].....	15
Figura 1.2	Diagrama general del sistema de evaporación de cuatro efectos.....	16
Figura 2.1	Diagrama de vapor vegetal.....	20
Figura 2.2	Esquema general del área de evaporadores.....	22
Figura 2.3	Diagrama general de ubicación de los sensores y electro-válvulas.....	25
Figura 2.4	Diagrama de bloques de la solución proyectada.....	27
Figura 2.5	Instrumentación requerida para el control por flujo de jugo.....	30
Figura 2.6	Diagrama de bloques del control por flujo de jugo.....	32
Figura 4.1	Hardware utilizado en la automatización de evaporadores [Ref.6].....	40
Figura 4.2	Diagrama de la ubicación del CPU en el rack de montaje [Ref. 6].....	41
Figura 4.3	PLC LC-700 instalado para el control automático de evaporadores.....	42
Figura 4.4	Diagrama de la conexión entre el CPU y la PC [Ref. 6].....	44
Figura 4.5	Transmisor de nivel BM-102.....	47
Figura 4.6	Funcionamiento teórico del BM-102 [Ref. 10].....	48
Figura 4.7	Pulsos eléctricos emitidos y recibidos por el BM-102.....	49
Figura 4.8	Comunicación analógica + digital en forma simultanea [Ref.11].....	50
Figura 4.9	Comunicación HART superpuesta a la señal analógica de corriente [Ref.12].....	51
Figura 4.10	Recta de carga para establecer una comunicación 4-20mA [Ref. 7]...	51
Figura 4.11	Transmisor de densidad DT-301 instalado para medir el Brix de la meladura.....	53
Figura 4.12	Celda capacitiva utilizada por el transmisor DT-301 [Ref. 7].....	54
Figura 4.13	Montaje del transmisor de flujo Optiflux1000.....	56
Figura 4.14	Principio de medición del transmisor de flujo electromagnético.....	57
Figura 4.15	Montaje del transmisor LD-301 en el tanque de jugo claro.....	59
Figura 4.16	Ubicación del diafragma en el tanque.....	60
Figura 4.17	Transmisor de presión LD-291[Ref.8].....	61
Figura 4.18	Celda capacitiva utilizada por los transmisores LD291 [Ref. 8].....	62

Figura 4.19	Válvula electro-neumática instalada para la regulación del flujo de meladura.....	63
Figura 4.20	Montaje del sensor de pH.....	64
Figura 4.21	Indicador local del 873APH.....	66
Figura 4.22	Transmisor de temperatura TT421 [Ref. 9].....	67
Figura 4.23	Conexión de tres líneas [Ref. 9].....	68
Figura 5.1	Estructura general de los lazos de control.....	72
Figura 5.2	Diagrama de bloques del lazo de control de Brix de meladura.....	73
Figura 5.3	Diagrama de bloques del lazo de control de nivel de evaporadores.....	74
Figura 5.4	Diagrama de bloques del lazo de control de flujo de jugo claro.....	75
Figura 5.5	Diagrama de bloques del lazo de control de vapor de relleno.....	77
Figura 5.6	Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura de meladura..	78
Figura 5.7	Ejemplo de aplicación del DB en la generación de señales de alarma...	79
Figura 5.8	Pantalla principal para el control de evaporadores.....	82
Figura 5.9	Pantalla para control de la temperatura de meladura.....	83
Figura 5.10	Recuadro desplegado para modificar los Set Point.....	84
Figura 5.11	Ubicación y uso de los enlaces.....	84
Figura 5.12	Variables de proceso.....	85
Figura 5.13	Curvas de proceso.....	86
Figura 5.14	Interfaz para el ajuste de los parámetros del controlador.....	87
Figura 5.15	Controles manuales para válvulas.....	88
Figura 5.16	Información contenida en el reporte de variables de proceso.....	90
Figura 5.17	Diagrama de la jerarquía del software utilizado [Ref. 6].....	93
Figura 5.18	Lista de direcciones creada para ser utilizada por el servidor OPC.....	94
Figura A.1	Estructura organizacional de CoopeAgri R.L.....	116

Índice de Tablas

Tabla 3.1	Cronograma de actividades.....	33
Tabla 4.1	Equipo utilizado para la automatización de evaporadores.....	39
Tabla 4.2	Ubicación de los transmisores en el módulo de entrada M-401-DR.....	42
Tabla 4.3	Distribución de las salidas del módulo M-501.....	43
Tabla 5.1	Datos requeridos y forma de cálculo del Brix Ponderado.....	91

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Proceso Productivo.

Para una mejor comprensión del proceso de elaboración de azúcar utilizado por el Ingenio el General a continuación se describen las principales etapas involucradas. En la figura 1.1 se ilustra el proceso en su totalidad.

Patio de caña: La caña que proviene de las romanas y la transportada por los productores hasta el Ingenio, es pesada por medio de un sistema de básculas electrónicas y luego muestreada con la ayuda de una sonda mecánica con la finalidad de determinar la calidad de la materia prima que se recibe en base a lo cual se le paga individualmente a cada uno de los productores; posteriormente se traslada a los patios donde un sistema de grúas la descarga en forma operativa en las mesas alimentadoras.

Picadoras de caña: La caña que ingresa por las mesas alimentadoras se hace pasar por un sistema de cuchillas colocados sobre el conductor, estas cuchillas son accionadas por turbinas de vapor, bajo las cuales se hace pasar el colchón de caña, con lo que se facilita el proceso de extracción de jugo en los molinos. Los conductores poseen un sistema de control de velocidad que forma parte del control automático de alimentación del primer molino, con lo cual se pretende impedir la formación de tacos y controlar la capacidad de molienda programada.

Molinos: La caña previamente preparada por las picadoras llega al tandem de molienda, el cual está constituido por cinco unidades de molinos, cada uno conformado por 4 mazas cilíndricas ranuradas, en medio de estas masas se hace pasar el colchón de caña y mediante presión es extraído el jugo, este jugo es recolectado por medio de canoas y bombeado a tanques de almacenamiento.

Cada molino se encuentra equipado con una turbina accionada por medio de vapor de 250 psi además de un sistema mecánico de transmisión encargado de reducir la velocidad de rotación a aproximadamente 6 rpm.

El bagazo que se obtiene después de hacer pasar la caña por los molinos es transportado hacia las calderas para ser utilizado como combustible en la generación de vapor de alta presión empleado por las turbinas para mover los molinos y en los turbogeneradores encargados de la producción de la energía eléctrica requerida por el ingenio. El vapor de escape de las turbinas es utilizado en las etapas de evaporación y cocimiento de jugos.

Sulfitación y alcalizado: El jugo extraído en la etapa de molinos recibe la denominación de *jugo diluido o mixto* y presenta un pH de 5.5. Este es sulfitado en torres de absorción que producen SO₂ en contracorriente para eliminar los compuestos formadores de color, a este jugo se le denomina *jugo sulfitado* y posee un pH alrededor de 4.7. A este jugo sulfitado se le agrega una lechada de cal con la intención de neutralizar la acidez y empezar los procesos de floculación encargados de la separación de los sólidos no azúcares que se encuentran diluidos en el jugo. El *jugo alcalizado* posee un pH de 7.2.

Calentamiento y clarificación: Por medio de intercambiadores de tubo y coraza el jugo alcalizado se calienta hasta una temperatura cercana a los 102-105°C y se almacenan en tanques clarificadores, donde los sólidos no azúcares floculados por la alcalización y el calentamiento se precipitan por gravedad y forman un lodo llamado *cachaza*. El jugo clarificado obtenido se filtra para eliminar partículas y se envía a los evaporadores.

Filtración: Para retirar el azúcar contenido en los lodos se someten a un proceso de filtración al vacío. En un inicio a los lodos se les agrega cal, bagacillo y floculante con la intención de aumentar su filtrabilidad para posteriormente ser bombeados hacia filtros rotatorios al vacío donde se separa los sólidos del jugo azucarado. El jugo turbio resultante se envía nuevamente a los tanques de jugo alcalizado para su tratamiento.

La materia sólida o torta resultante del proceso de filtración es conducida hacia un patio fuera de la planta, donde es almacenada para posteriormente ser utilizada como abono orgánico en la estabilización de suelos en materia orgánica.

Evaporación: El jugo claro es bombeado desde tanques de almacenamiento hasta los evaporadores, inicialmente este jugo contiene 15 °Brix¹ de sólidos disueltos, es concentrado por evaporación de múltiple efecto y se entrega con una concentración cercana a los 60 °Brix. A este jugo se le denomina meladura.

La estación de evaporación esta formada por una línea de evaporadores en cuádruple efecto la cual es alimentada por vapor de escape de baja presión procedente de las turbinas de los molinos.

Clarificación de meladura: La meladura obtenida de la estación de evaporación es sometida a una segunda clarificación por flotación con ácido fosfórico, floculante, cal y aire para de esta forma separarle la espuma que contiene los sólidos no azúcares que no fue posible extraer en la primera clarificación de jugo alcalizado. La meladura previamente sulfitada en torres de absorción de dióxido de azufre es enviada a los tanques de alimentación de los tachos², donde es concentrada y cristalizada.

¹ Ver Apéndice A.2.1

² Idem.

Cristalización: La sacarosa contenida en la meladura es cristalizada por medio de evaporadores de simple efecto o tachos, de tal forma que la meladura es llevada hasta la zona meta de sobresaturación, resultando un material denominado *masa cocida* formado por líquido (miel) y cristales (azúcar).

Centrifugación: Los cristales se separan del líquido por medio de la fuerza centrífuga ejercida por tambores rotatorios con mallas en el interior. Durante el proceso de centrifugado, el azúcar es lavado con agua caliente para remover la película de miel que cubre los cristales y se traslada al secador.

La miel que se obtiene en las centrifugas es enviada nuevamente a los tachos para su posterior cristalización. Después de tres cristalizaciones consecutivas se obtiene una miel agotada denominada *miel de purga*, esta miel es retirada del proceso y se comercializa entre otras cosas para la alimentación de ganado.

Secado: El azúcar húmeda obtenida en las centrifugas se transporta hasta la secadora, la cual consiste de un tambor rotatorio inclinado en el cual el azúcar está en contacto con aire caliente que entra en contracorriente. El aire utilizado en la secadora se calienta con vapor en intercambiadores tipo radiador y hace ingresar a la secadora por medio de un ventilador. Por otra parte el azúcar seco que sale de la secadora se clasifica para remover los terrones de azúcar que pueda contener.

Envase: El azúcar seco con una humedad cercana al 0.05% y a una temperatura de 50°C se empaca en sacos de 50 kilogramos y en bolsas de 2 kilogramos para su almacenamiento en bodega.

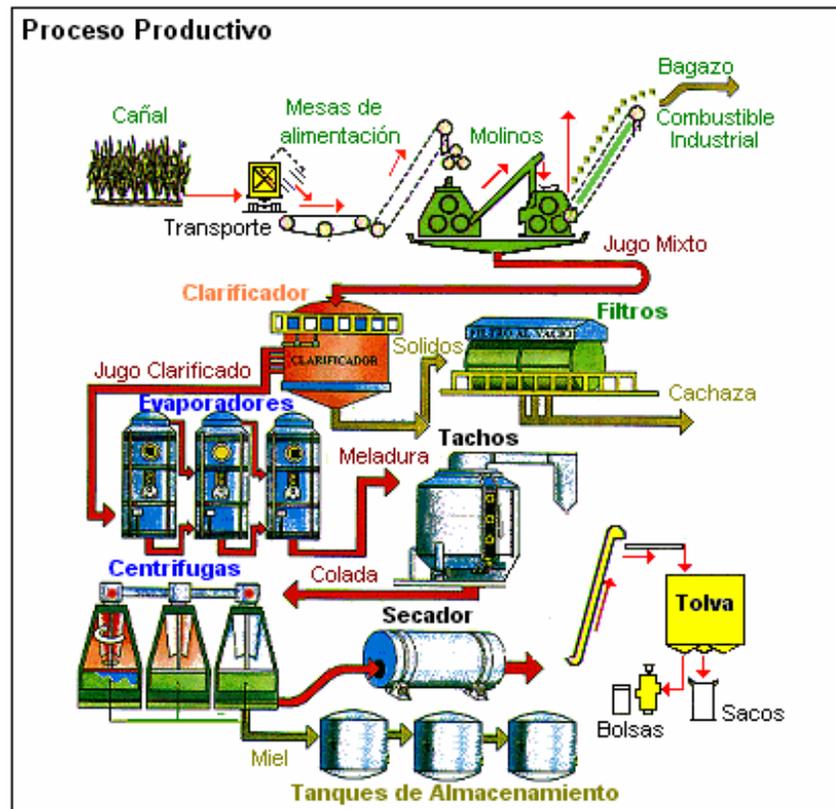


Figura 1.1 Diagrama del proceso de elaboración de azúcar [Ref. 13]

1.3 Problema existente e importancia de su solución.

La gran crisis energética que vive nuestro país y el mundo entero exige a las empresas el máximo aprovechamiento de los recursos utilizados en sus procesos productivos. Con la intención de mantenerse como una empresa competitiva en el mercado azucarero, Ingenio CoopeAgri se encuentra en un proceso de modernización en el que se pretende realizar la automatización de las diferentes etapas de la línea de producción.

En la figura 1.2 se presenta un esquema general del proceso de evaporación. Se cuenta con un sistema de cuádruple efecto en el cual una unidad de vapor es capaz de evaporar cuatro unidades de agua. El primer efecto se encuentra constituido por tres vasos³, el segundo por dos y los dos restantes por uno, de manera que se dispone de un total de siete vasos. El vapor que se genera en el primer efecto se utiliza para calentar el jugo del segundo efecto y así sucesivamente. Al vapor extraído del jugo en esta área se le conoce como vapor vegetal. Conforme el jugo avanza a través de los vasos de evaporación su densidad aumenta, logrando pasar de entre 13 y 18 °Brix en la entrada a valores entre los 55 y 65 °Brix en la salida, al jugo de salida se le llama meladura.

El proceso de evaporación es controlado en forma completamente manual, un operador se encarga de regular el nivel en la calandria⁴ de los vasos por medio de válvulas mecánicas reguladoras de flujo y toma muestras de meladura aproximadamente cada hora para luego enviarlas al laboratorio donde son analizadas. A partir de los resultados de densidad brindados por el laboratorio el operador regula por medio de válvulas mecánicas la salida de meladura del último vaso de evaporación.

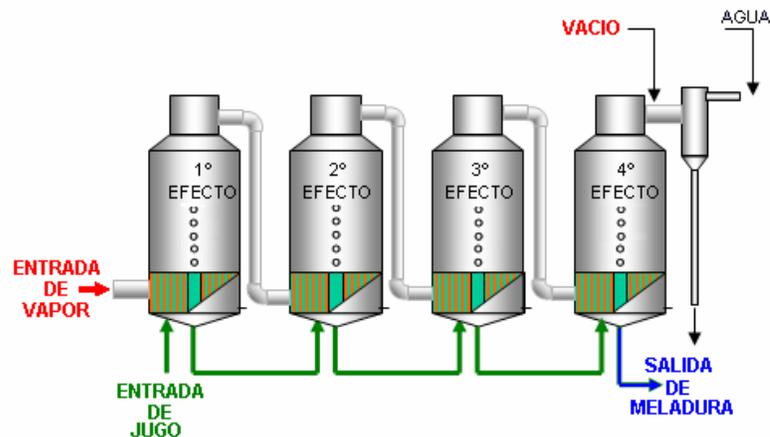


Figura 1.2 Diagrama general del sistema de evaporación de cuatro efectos.

³ Ver apéndice A.2.1

⁴ Idem.

Las variaciones en la densidad de jugo y la presión del vapor de escape que entrada a los evaporadores producen cambios en parámetros muy importantes como lo son el nivel de jugo en las calandrias y la densidad de meladura obtenida al final del proceso. Al realizarse el control en forma manual no se tiene una estimación estricta de estas variables, lo que aumenta considerablemente los tiempos de respuesta disminuyendo la eficiencia.

Por otra parte, al no mantenerse los niveles óptimos en las calandrias, se presentan algunos problemas entre los que se encuentran: deficiente transferencia de calor con el consecuente desaprovechamiento del área de evaporación, daño mecánico en los tubos de las calandrias como consecuencia del sobrecalentamiento, niveles altos ahogan el sistema y reducen la velocidad de movimiento del flujo.

El problema reside en las fluctuaciones que se dan tanto en el nivel de jugo presente en las calandrias de los evaporadores como en la densidad de meladura obtenida al final de la etapa, lo cual representa un decaimiento en la eficiencia del sistema y un aumento en los gastos de operación.

Con la automatización del área de evaporadores se garantiza un mayor aprovechamiento de los recursos energéticos y humanos utilizados en el proceso, se mejora la eficiencia y se mantienen algunos de los parámetros para un adecuado funcionamiento, lo cual ofrece grandes ventajas a la siguiente etapa ya que recibe meladura a una densidad adecuada. Además se monitorea en tiempo real el nivel del tanque de jugo claro, permitiéndole a los operadores evaluar las condiciones de operación y minimizar la posibilidad de paradas de la molienda por llenos.

1.4 Meta y objetivos.

1.4.1 Meta.

Disminuir los costos de producción mediante un aumento en la eficiencia del área de evaporadores.

1.4.2 Objetivo general.

Implementar un sistema de control capaz de lograr un aumento en la eficiencia del área de evaporadores, manteniendo la densidad de la meladura de salida en el rango comprendido entre los 55 y 65 °Brix.

1.4.3 Objetivos específicos.

a. Objetivos de hardware.

- Seleccionar los sensores que mejor se adapten a las condiciones físicas y químicas del proceso.
- Seleccionar el controlador adecuado para el procesamiento de los datos obtenidos por los sensores.
- Diseñar e implementar la etapa de control que permita lograr la automatización por flujo de jugo y densidad de meladura del área de evaporadores.

b. Objetivos de software

- Realizar las rutinas de programación del controlador.
- Desarrollar un programa de alto nivel que permita la visualización de los parámetros medidos en una computadora.

c. Objetivos de documentación

- Realizar un manual de usuario en el que se detallen aspectos de funcionamiento y puesta en marcha del sistema.
- Realizar una capacitación al personal a cargo de la operación del área de evaporadores.

d. Objetivos de implementación

- Implementar el sistema de control del área de evaporadores.
- Realizar la comunicación entre el controlador y la computadora.

CAPITULO 2

2. ANTECEDENTES

2.1 Estudio del problema a resolver.

2.1.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar.

El área de evaporación recibe la caracterización de centro de balance energético del ingenio, debido a que toma los vapores de escape de alta presión y entrega vapor vegetal con baja presión a los evaporadores, precalentadores, condensadores y tachos. En la figura 2.1 se presenta un diagrama de vapor vegetal en el que se muestra sus usos en las diferentes etapas del proceso, de tal forma que se garantiza un buen aprovechamiento de la energía disponible.

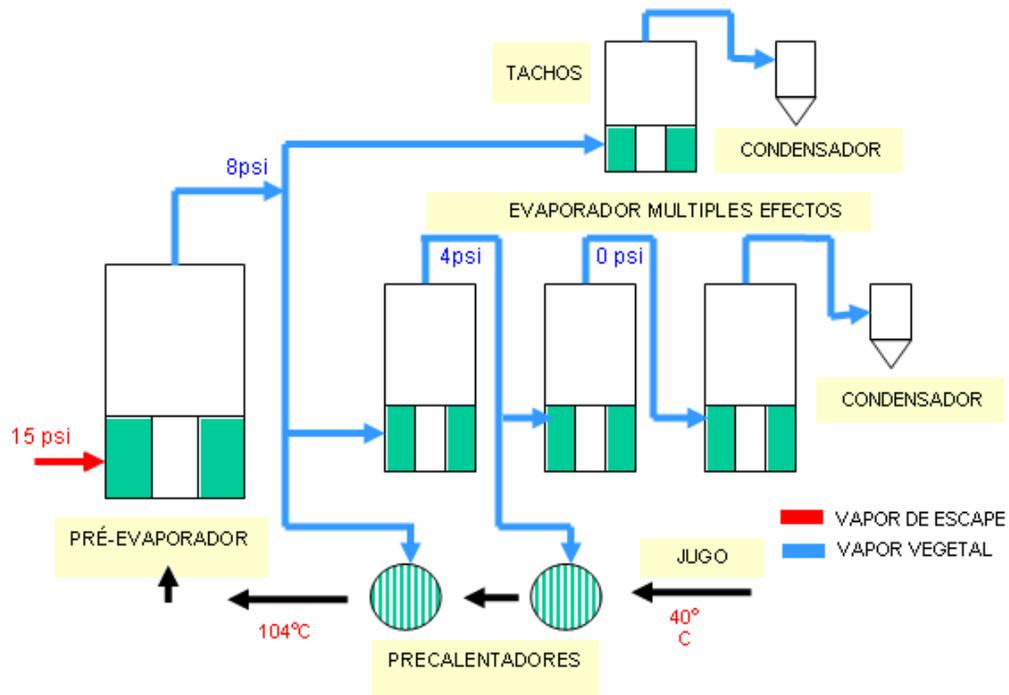


Figura 2.1 Diagrama de vapor vegetal.

El procesamiento del jugo en etapas anteriores proporciona un jugo claro compuesto por azúcar diluido con ciertas impurezas. Como ya se eliminaron la gran mayoría de las impurezas, es necesario evaporar una cantidad de agua, siendo la finalidad del área de evaporación. De esta manera, a medida que el agua es extraída del jugo este se aproxima a su punto de saturación y se empiezan a formar cristales dentro de la meladura.

El punto de cristalización del jugo se presenta aproximadamente entre los 78 a 80 °Brix. Teóricamente es posible lograr obtener una meladura de hasta 75 °Brix, pero debido a las manipulaciones y condiciones de operación, obtener una meladura de esa concentración no es práctico, lo acostumbrado es tener una concentración de la meladura entre los 55 y 65 °Brix, esto con el fin de prescindir de cristales falsos y lograr una mejor manipulación.

En el área de evaporación se encuentran ubicados los vasos llamados evaporadores constituidos principalmente por una calandria tubular encargada del intercambio de calor, así el vapor caliente pasa alrededor de los tubos y el jugo claro por el interior. El vapor de la calandria con temperatura y presión controlada es condensado liberando un calor latente en el exterior de los tubos, de esta forma el jugo que pasa por los tubos a una temperatura menor absorbe el calor liberado durante la condensación del vapor y aumenta su temperatura.

El vapor utilizado en los pré-evaporadores corresponde a vapor de escape de las turbinas del turbogenerador y los molinos, logrando en operación normal una presión de vapor de escape cercana a las 15 psi. En promedio el proceso de evaporación requiere de 200 a 300 kilos de vapor para lograr evaporar 1000 kilos de agua, comparativamente el área de cocimiento o tachos consume cerca de 1100 kilos de vapor para lograr evaporar los mismos 1000 kilos de agua.

Por tratarse de un sistema de evaporación de múltiples efectos, el vapor vegetal del primer efecto es alimentado al siguiente vaso a así sucesivamente, lográndose como resultado una disminución de presión en el vaso siguiente. En el ingenio se cuenta con un arreglo en serie de cuatro efectos o cuádruple efecto como el mostrado en la figura 2.2, capaz de evaporar cuatro unidades de agua por cada unidad de vapor utilizada. En el cuerpo del último efecto se aplica vacío con el propósito de garantizar la presión y temperatura adecuada en cada uno de los cuerpos, así como bajar el punto de ebullición del jugo a tal grado que facilita la evaporación.

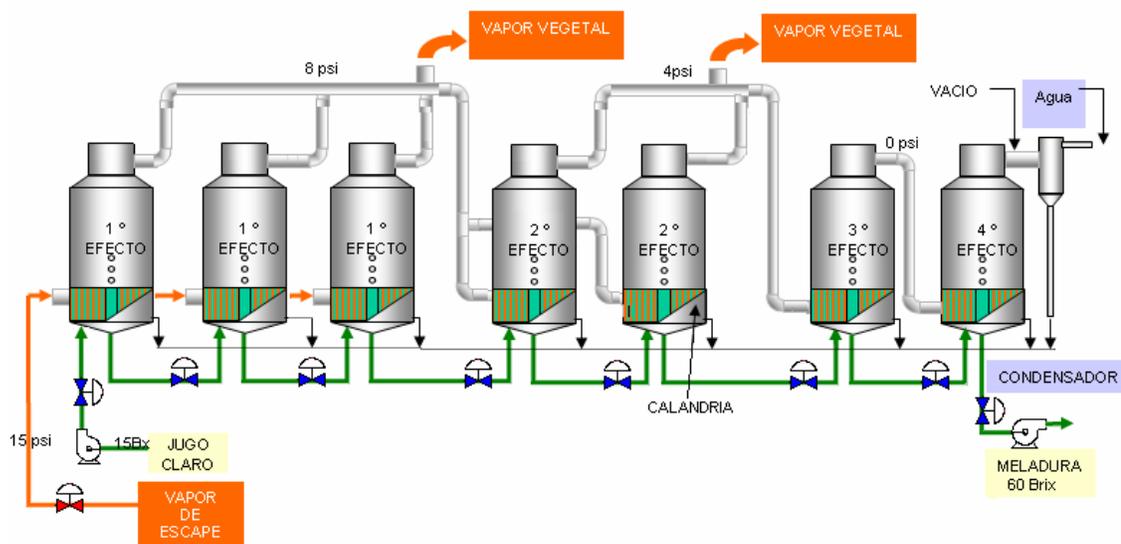


Figura 2.2 Esquema general del área de evaporadores.

El control del área de evaporadores esta a cargo del operador, encargado de tomar las decisiones basándose en indicadores visuales de temperatura, presión y nivel, además de pruebas de densidad realizadas en laboratorio. Las pruebas de densidad se realizan a muestras tomadas aproximadamente cada hora y la determinación del nivel de jugo en las calandrias de los vasos se realiza mediante revisiones frecuentes de los indicadores por parte del operador. La regulación del flujo de jugo y meladura la realiza el operario por medio de válvulas mecánicas ubicadas en las tuberías.

2.1.2 Características operativas.

Desde que se instaló el ingenio el control de las variables involucradas en el proceso de evaporación se realiza en forma completamente manual, lo cual acarrea algunos inconvenientes, entre los que se encuentran:

- Evaporación en tandas: como el control de las válvulas de jugo, vapor y meladura lo realiza un operador, normalmente ante valores altos o bajos ya sea de presión de vapor, nivel en los evaporadores o brix de la meladura, la acción correctiva tiende a ser la de cerrar o abrir válvulas en forma abrupta, provocando caídas de presión y flujos excesivos lográndose una operación errática conocida como evaporación en tandas.
- Golpe de ariete: Cuando se cierra en forma rápida la válvula colocada en una tubería que conduce algún líquido o vapor, se produce un reflejo de alta presión que golpea las bombas y los demás equipos conectados a la línea, este efecto es conocido como golpe de ariete.
- Retardo de muestreo: Para la determinación del brix de la meladura de salida se toman muestras aproximadamente cada hora y se trasladan al laboratorio para su análisis, una vez obtenidos los resultados estos deben ser llevados y comunicados al operador, lo cual introduce un gran retardo entre el tiempo de medición y la acción correctiva.
- Salud ocupacional: El área de evaporadores es un sector sumamente caliente lo cual representa condiciones no aptas para la permanencia prolongada de personas.

2.2 Requerimientos de la empresa.

- Se debe monitorear y controlar el nivel de jugo en las calandrias de los vasos de evaporación.
- Se debe monitorear y controlar la densidad de la meladura obtenida al final del proceso de evaporación.
- Se debe controlar, monitorear y totalizar el flujo de jugo en la entrada del tren de evaporadores.
- El nivel de jugo en las calandrias debe mantenerse en el rango especificado para lograr niveles óptimos de transferencia de calor.
- El sistema de control desarrollado debe tener la capacidad de trabajar en forma paralela con el control manual existente.
- Los sensores a instalar deben soportar los químicos utilizados en los procesos de limpieza y las altas temperaturas de operación de los evaporadores.

2.3 Propuestas de solución.

Para lograr el control en forma automática del proceso de evaporación se proponen dos alternativas de solución.

Sistema de control electrónico de evaporadores mediante el uso de un microcontrolador.

Se propone el diseño de un sistema de control que sea capaz de medir y controlar el nivel de los vasos de evaporación y la densidad de la meladura de salida, a partir de cuyos datos debe regular un grupo de electro-válvulas que deben ser instaladas en las tuberías encargadas de transportar el jugo entre los diferentes evaporadores.

En la figura 2.3 se muestra el diagrama general del sistema de evaporación, en el que se indica la ubicación de las electro-válvulas, el sensor de densidad (TBrix) y los sensores de nivel (TN) requeridos por el sistema de control para lograr la regulación del nivel de los diferentes vasos de evaporación.

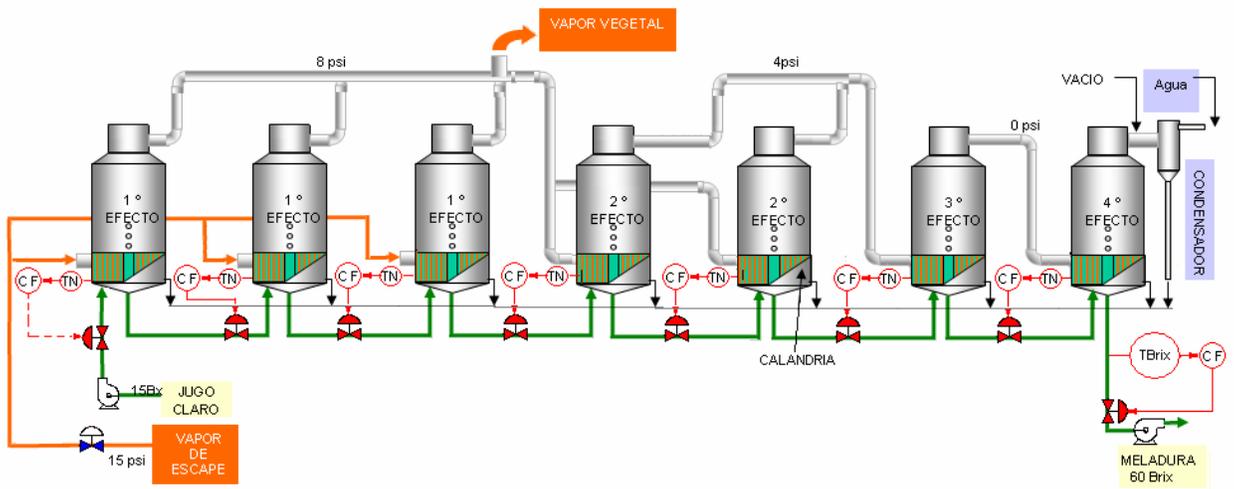


Figura 2.3 Diagrama general de ubicación de los sensores y electro-válvulas.

A partir de los datos suministrados por los sensores de nivel y de densidad, la unidad de control debe regular la posición de las electro-válvulas y de esta forma controlar el nivel de jugo en los evaporadores. Se debe ubicar un sensor de nivel en cada vaso y una electro-válvula en la tubería de alimentación de jugo. En el caso del sensor de densidad, este debe ser instalado en la tubería de salida de meladura del último vaso de evaporación y se encarga de suministrar la información requerida por la unidad de control para lograr el posicionamiento de la electro-válvula reguladora de flujo ubicada en la misma tubería, de tal forma que ante densidades de meladura bajas se disminuya la evacuación de meladura del último vaso hasta lograr la concentración deseada.

En la figura 2.4 se muestra el diagrama de bloques de la solución proyectada. Los bloques de medición corresponden a sensores instalados directamente en el proceso, encargados de transmitir en forma analógica por medio de una señal de corriente de 4 a 20 mA. El bloque denominado convertidor de analógico a digital se encarga de pasar la señal de 4 a 20 mA a un código digital comprensible para el microcontrolador. Los microcontroladores se encargan de procesar los datos obtenidos por los sensores y los introducidos por el usuario a través de la etapa de control de densidad; a partir del análisis de estos datos transmite en forma digital las acciones a tomar a la siguiente etapa, la cual convierte los códigos digitales en señales analógicas equivalentes, utilizadas por el bloque posicionador de válvulas para colocar las válvulas en el grado de abertura indicado por el microcontrolador y de esta forma lograr variaciones en la cantidad de jugo que entra y sale de los evaporadores, controlando el nivel en los mismos. De esta forma la fase de control de densidad es administrada directamente por el usuario siendo este el encargado de determinar la densidad de meladura deseada.

Los bloques de control de densidad y despliegue de datos deben ser implementados en una computadora con la ayuda de un software de alto nivel, de forma tal que permita mediante una interfaz gráfica amigable con el usuario el despliegue de los datos obtenidos por los sensores.

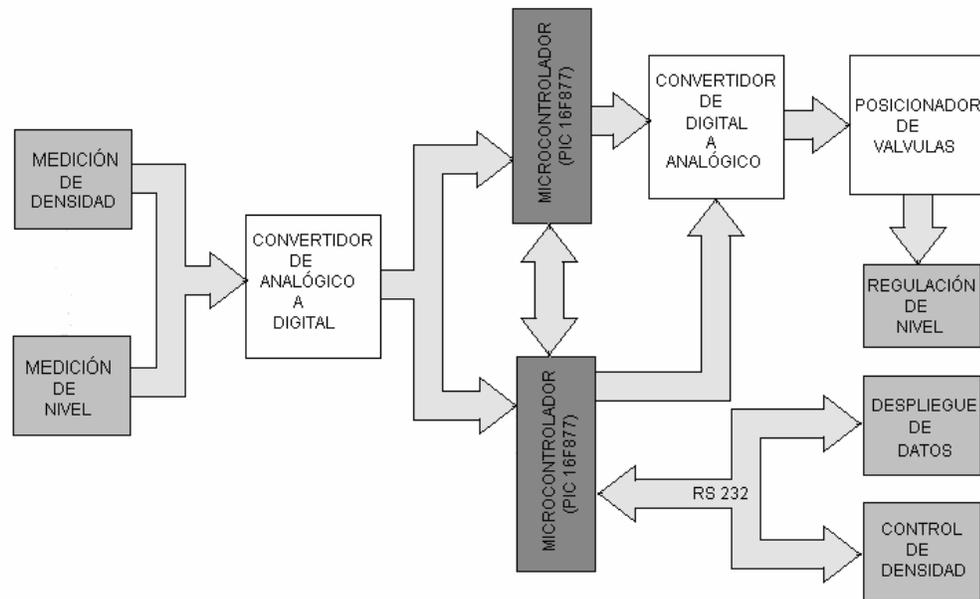


Figura 2.4 Diagrama de bloques de la solución proyectada.

Sistema de control electrónico de evaporadores empleando un PLC y la filosofía de regulación del flujo de jugo.

Esta filosofía del control de la evaporación consiste en mantener el flujo de jugo claro de entrada y la concentración de la meladura de salida, a la vez que se controla el nivel de jugo en las calandrias de los pre-evaporadores.

Conociendo la tasa de evaporación del tren de evaporadores es posible calcular el flujo ideal de alimentación de jugo claro para obtener una concentración deseada de meladura a la salida, esto con una evaporación limpia. De esta forma se establece un Set Point del flujo de jugo claro; sin embargo, con el paso del tiempo, los vasos van perdiendo eficiencia debido a factores como incrustaciones o baja calidad de vapor; es aquí donde el control de grados Brix de meladura regula el flujo de salida.

La regulación del flujo de salida provoca variaciones en el nivel de los vasos, en el primer vaso se coloca un sensor de nivel para detectar el incremento y comunicarlo a la unidad de control, la cual con ayuda de una electro-válvula ordena la disminución del flujo de entrada. En la figura 2.5 se muestra un diagrama con la instrumentación requerida para realizar este tipo de control.

En la figura 2.5 se muestra la ubicación de las tres electro-válvulas (rojas) utilizadas para la regulación del flujo, se ubica una en la tubería de entrada de jugo claro del tren de evaporadores, otra en la tubería de salida de meladura del último vaso y otra entre las tuberías de vapor de alta y vapor de escape. Estas electro-válvulas son reguladoras de flujo del tipo mariposa con disco excéntrico, de tal manera que su ángulo de operación puede variar entre los 0° y los 90° .

Se colocan sensores con capacidad para comunicar los datos por medio de señales eléctricas que permitan obtener un mejor monitoreo de las variables a controlar. Para la determinación del nivel en la calandria se utilizan medidores de tecnología radar de onda guiada del tipo BM 102 (TN en la figura 2.5), entre las principales ventajas de este sensor es importante resaltar que su medida es independiente de la temperatura, presión y densidad del medio, es de alta resolución y soporta el contacto con químicos disueltos utilizados en labores de limpieza tales como el HCl (ácido clorhídrico).

Para la medida de la densidad de meladura se utiliza un sensor de SMART de tipo DT301 ampliamente probado en la industria azucarera (TBrix en la figura 2.5). Entre sus principales características se encuentran la capacidad de ser instalado directamente en tuberías, su alta resolución (± 0.1 °Brix), sensor interno para la compensación de temperatura, no requiere limpieza y al igual que el sensor de nivel soporta el contacto con los químicos como el HCl disuelto. El DT301 se comunica con la unidad de control y ésta a su vez actúa sobre la electro-válvula de salida, la cual debe posicionarse en un grado de abertura tal que permita lograr una variación del flujo y por ende un aumento o decremento de la densidad de meladura.

Además es necesario instalar un sensor de flujo optuflux 1000 (TF en la figura 2.5) que transmite una señal analógica proporcional al flujo de jugo por la tubería, esto le permite a la unidad de control determinar que tan por debajo o por encima del Set Point de flujo de jugo se encuentra operando los evaporadores para posteriormente realizar las correcciones necesarias.

Para garantizar una presión de vapor de escape estable a la entrada de los pre- evaporadores se requiere la instalación de un sistema de control de vapor de relleno. Para este lazo de control se utilizan dos transmisores de presión, uno en la tubería de baja presión y otro en la de alta, además se requiere una válvula con posicionador electrónico para regular la cantidad de vapor de alta presión que se inyecta a la tubería de vapor de escape o de baja presión. El control del posicionador de la válvula se encuentra a cargo de la unidad de control, esta debe interpretar los datos suministrados por los transmisores de presión y tomar las decisiones necesarias para garantizar la estabilidad en la presión de vapor de escape.

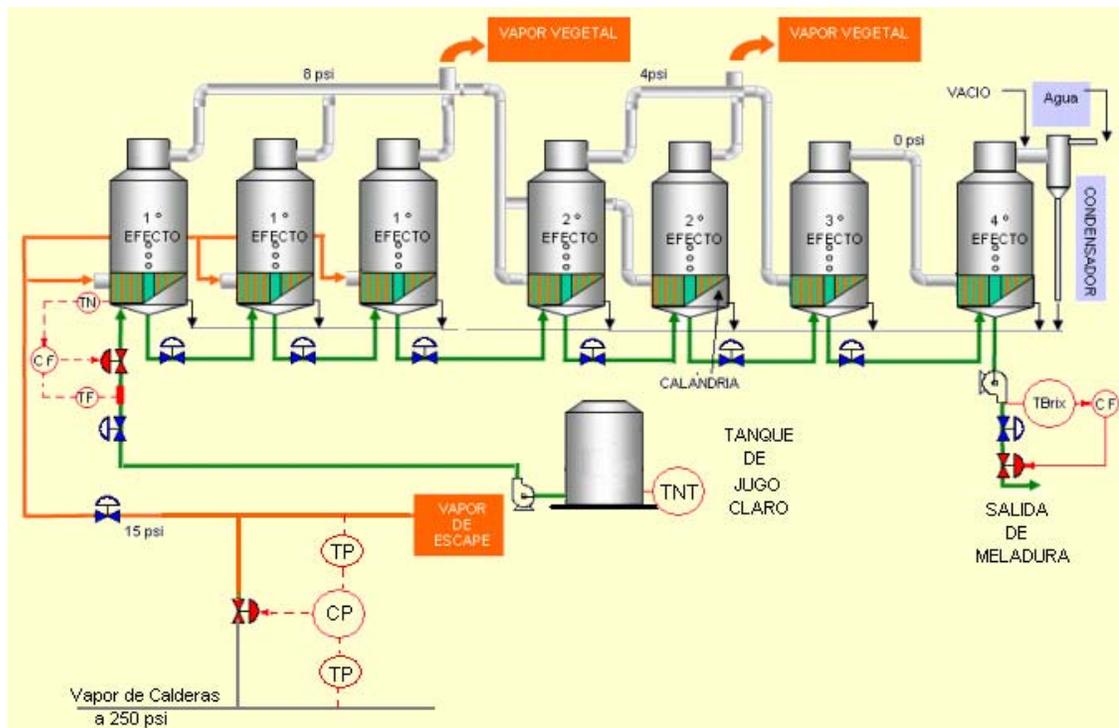


Figura 2.5 Instrumentación requerida para el control por flujo de jugo.

Además se agrega un transmisor de nivel al tanque de jugo claro, permitiéndole al operador de evaporadores tener una noción en tiempo real del nivel de jugo presente. Como el jugo que entra a los evaporadores es bombeado desde este tanque en caso de detectarse niveles altos o bajos se deben tomar las medidas pertinentes para no derramar jugo y garantizar la continuidad del proceso. En este caso se utiliza un transmisor de nivel de sellos remotos (TNT en la figura 2.5) cuya medida se basa en la determinación de la presión diferencial, como el tanque se encuentra abierto a la atmósfera solo se requiere un sello colocado en la parte inferior del tanque. Es importante tomar en cuenta que esta señal se utiliza únicamente para visualización, por lo tanto cualquier medida a tomar relacionada con niveles extremos se encuentra a cargo del operador de evaporadores.

Para lograr una mayor comprensión en la figura 2.6 se muestra el diagrama de bloques de la solución propuesta, como unidad de control se utiliza un PLC de la serie LC700 el cual se comunica en forma serial con una computadora utilizando el protocolo RS-232. Los bloques correspondientes al despliegue de datos y al control de densidad se desarrollan en una computadora con la ayuda de un software de programación llamado Genesis 32, de tal manera que el usuario puede visualizar parámetros importantes tales como: flujo de jugo de entrada, nivel del primer vaso de evaporación, densidad de la meladura de salida, presión de vapor de escape, entre muchos otros. Además puede controlar una gran cantidad de parámetros por medio de la introducción de datos a través de una computadora. De esta forma se logra un Sistema de Comunicación y Adquisición de Datos (SCADA) donde la información obtenida por los sensores es procesada y enviada para ser visualizados en una PC.

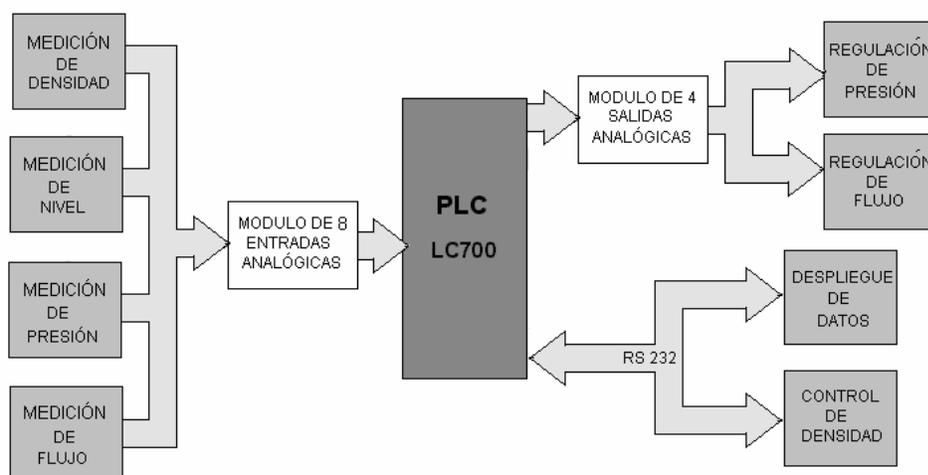


Figura 2.6 Diagrama de bloques del control por flujo de jugo.

Los bloques de medición de densidad, de nivel, de flujo y de presión corresponden a sensores capacitados para transmitir los datos por medio de señales analógicas de corriente comprendidas entre los 4 y los 20 mA. Por otro lado, los bloques de regulación de flujo reciben señales analógicas de 4 a 20 mA y se encargan de posicionar las válvulas en grados de abertura proporcionales a la señal recibida.

Como alternativa de solución al problema se implementó el *Sistema de control electrónico de evaporadores empleando un PLC y la filosofía de regulación del flujo de jugo*. Entre las ventajas que ofrece este sistema sobre el basado en un microcontrolador y nivel se encuentran:

- Posibilidad de aprovechar la licencia del software Génesis-32 que posee CoopeAgri.
- Posibilidad de expansión de los alcances del proyecto con una inversión mínima.
- La robustez del PLC lo hace más adecuado que el microcontrolador para operar los evaporadores.
- Requiere una menor inversión en instrumentación.

CAPITULO 3

3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.

3.1 Cronograma de actividades.

Para la elaboración del proyecto se efectuaron una serie de actividades que contribuyeron significativamente a la conclusión exitosa del mismo. En la tabla 3.1 se muestran las actividades realizadas.

Tabla 3.1 Cronograma de actividades.

	Descripción	Antecesor Inmediato
A	Estudiar el funcionamiento de los evaporadores.	-
B	Determinar las características apropiadas de los equipos y sensores a utilizar.	A
C	Escoger los equipos y sensores que mejor se adapten a los requerimientos del proyecto.	A
D	Realizar el diseño de la etapa de control.	C
E	Escribir rutinas de programación para la unidad de control.	D
F	Escribir rutinas del programa a nivel de la PC para el monitoreo de variables.	D
G	Realizar la simulación de los sensores para verificar el funcionamiento de la etapa de control.	E
H	Realizar un reporte escrito con los avances logrados.	E,F
I	Instalar los sensores y electro-válvulas en la planta.	G
J	Calibrar los transmisores y electro-válvulas.	G
K	Realizar pruebas de comunicación entre el PLC y la PC.	E,F
L	Instalación del sistema de control en la planta.	J
M	Efectuar pruebas de funcionamiento al sistema instalado en la planta.	L
N	Realizar correcciones para lograr el correcto funcionamiento del sistema de control.	M
O	Efectuar el informe y la presentación final del proyecto	N

3.2 Descripción de las actividades.

- Estudiar el funcionamiento actual de los evaporadores.

Como primer actividad se realizó una investigación sobre el funcionamiento de los evaporadores. Como primer paso se mantuvieron algunas reuniones con ingenieros y personal a cargo del proceso de producción de la planta, haciendo énfasis en las personas directamente relacionadas con el proceso de evaporación. Como segundo paso se investigó en Internet sobre sistemas de control automático instalados en otros ingenios del mundo, especialmente en los ingenios brasileños como líderes mundiales en producción de azúcar.

- Determinar las características apropiadas de los equipos y sensores a utilizar.

Para la determinación de las características de los equipos requeridos se realizó un análisis de las condiciones térmicas y químicas de operación de evaporadores, para lo cual se contó con la asesoría de ingenieros de la empresa. De esta manera se determinaron las condiciones bajo las cuales debían operar los equipos y por ende muchas de las características principales de los mismos.

- Escoger los equipos y sensores que mejor se adapten a los requerimientos del proyecto.

Por adquiridos los datos de las condiciones de operación se realizó una amplia búsqueda en Internet de equipos con capacidad para medir y controlar las variables requeridas y además soportar las condiciones termo-químicas del proceso. Durante el desarrollo de esta actividad se contactó con varios proveedores de equipos de control alrededor del mundo, entre los que destaca SMAR como fabricante de varios equipos de medición y control utilizados por otros ingenios en procesos similares.

- Realizar el diseño de la etapa de control.

Una vez seleccionados los equipos y definidos los proveedores de los mismos se procedió a realizar la determinación y el diseño de los lazos de control requeridos. Para esto se utilizó como equipo base el PLC LC 700 sobre el cual se diseña toda la estrategia de control.

- Escribir rutinas de programación para la unidad de control.

Como en la actividad anterior se diseñó la estrategia de control, se definió como paso siguiente la programación de la misma, para lo cual se utilizó el software CONF 700 provisto por el fabricante del PLC. Cada lazo de control se programa en forma independiente, lo cual garantiza un mayor orden y por ende un menor costo de depuración del programa.

- Escribir rutinas del programa a nivel de la PC para el control y monitoreo de variables.

Para lograr el control y monitoreo de todas las variables incluidas en la automatización de evaporadores se requirió de la utilización de una computadora. Toda la parte gráfica de visualización y control se programó con la ayuda del software GraphWorX32, con este programa se elaboraron varias pantallas por medio de las cuales el operador de evaporadores puede leer, interpretar y analizar las condiciones bajo las cuales se encuentra operando el sistema. Además se utiliza el software TrendWorX32 para la configuración de dos reportes diarios, para la elaboración de estos reportes se crea una base de datos en Microsoft Access sobre la cual se escriben los valores alcanzados por las variables durante el transcurso del día, de esta forma es posible leer los datos diarios y almacenarlos en archivos independientes, estos archivos pueden ser accedados en el momento que el personal a cargo lo considere conveniente.

- Realizar un reporte escrito con los avances logrados.

Con la intención de documentar los avances logrados en el proyecto se realizó un informe parcial en el que se detallan aspectos relacionados con la selección de los equipos de medición (transmisores), de control (PLC) y los actuadores (válvulas electro-neumáticas). También se abarca lo referente a la programación del PLC, las interfaces para control y visualización y la generación de históricos.

- Realizar la simulación de los sensores para verificar el funcionamiento de la etapa de control.

Para probar el programa del PLC y la comunicación con la computadora se realizaron simulaciones de los transmisores utilizando un simulador de miliamperaje, por medio del cual se generaron señales equivalentes a las suministradas por los transmisores (4 a 20 mA) y se observó simultáneamente el comportamiento del sistema.

- Instalar los sensores y electro-válvulas en la planta.

Antes de realizar la instalación de los sensores y actuadores en la planta fue necesario modificar y elaborar algunas estructuras. Después de realizados los ajustes estructurales se elaboró el cableado eléctrico necesario para conectar todos los equipos con el PLC y la computadora ubicados en el cuarto de control de evaporadores. Luego de acondicionar los lugares específicos donde se deben ubicar los transmisores y válvulas se procedió a su montaje.

- Calibrar los transmisores.

Luego de instalados los equipos en la planta se procedió a su calibración, para lo cual se utilizaron dos programas. En el caso de los equipos de la marca SMAR (DT-301, LD301, LD291, TT421) se utilizó el software CONF401 con capacidad para comunicarse a través de una interfaz HI311 (HART/USB) con los transmisores. Para el transmisor de nivel BM-102 se utilizó el programa PCSTAR2 suministrado por KROHNE como fabricante del equipo y al igual que en el caso anterior se requirió del adaptador HI311 para lograr la comunicación entre la PC (con puerto de comunicación USB) y el transmisor (con protocolo de comunicación HART). Además por medio de un configurador tipo HPC301 "Hart Pocket Configurator" adaptado a una Palm se realizaron ajustes rápidos a los transmisores, ya que por su tamaño es ideal para ser utilizado en los lugares donde se ubican los equipos.

- Realizar pruebas de comunicación entre el PLC y la PC.

Las pruebas de comunicación entre el PLC y la computadora se realizaron en primera instancia durante la descarga del programa de configuración del PLC. Luego se realizaron pruebas específicas con la ayuda de los controles manuales para las válvulas, para estas pruebas se aumentaba o disminuía la salida asociada a una válvula en específico y con ayuda de un amperímetro se medía la salida.

- Instalación del sistema de control en la planta.

Como siguiente paso se realizó la unificación del sistema de control, se instaló y configuro la computadora y se conectaron todas las señales tanto de entrada como de salida del PLC a los respectivos transmisores y actuadores.

- Efectuar pruebas de funcionamiento al sistema instalado en la planta.

Ya con el ingenio en operación y todos los equipos instalados y calibrados se realizaron algunas pruebas de ajuste del sistema. En primera instancia se dejó a cargo del sistema de control el lazo de control de nivel de jugo en los evaporadores, luego el de control del flujo de jugo claro y así sucesivamente se fue activando uno a uno cada lazo de control. Como solamente un lazo de control se activaba a la vez la determinación de los ajustes requeridos por el sistema se realizó en forma rápida.

- Realizar correcciones para lograr el correcto funcionamiento del sistema de control.

Después de efectuadas las pruebas al sistema se determinaron los ajustes requeridos y se realizaron las correcciones necesarias para optimizar el control y lograr los tiempos de respuesta para el correcto funcionamiento del sistema de control.

- Efectuar el informe y la presentación final del proyecto realizado.

Para la elaboración del informe se compila toda la documentación generada durante el desarrollo del proyecto y se organiza para ser presentada como documento oficial a los supervisores del proyecto, en este caso al Ingenio CoopeAgri y al Instituto Tecnológico de Costa Rica. Adicionalmente se realizó un manual de usuario y datos técnicos que debe ser leído y estudiado con anterioridad por **cualquier** persona destinada a operar el sistema. Además se realizó una presentación formal del proyecto tanto en la empresa como en la universidad y una capacitación al personal a cargo de la operación y el mantenimiento del equipo.

CAPITULO 4

4. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE UTILIZADO.

4.1 Descripción general.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos del proyecto y a la vez cubrir los requerimientos planteados por la empresa se emplearon una serie de equipos, en la tabla 4.1 se tabula el hardware utilizado y una pequeña descripción de cada uno, además en la figura 4.1 se presenta un esquema. En esta sección no se toma en cuenta los equipos utilizados para la calibración.

Tabla 4.1 Equipo utilizado para la automatización de evaporadores.

Cantidad	Tipo	Modelo	Descripción
1	PLC	LC-700	PLC de control
1	PC	PC	Computadora para control, almacenaje y despliegue de información
1	BM102	BM102	Transmisor de nivel por radar de onda guiada
1	DT-301	DT301I-1IS-101-51	Transmisor de densidad
1	Flujómetro	Optiflux1000	Transmisor de flujo tipo electromagnético
1	LD301	LD-301L-21I-B000-01-92013-I1	Transmisor de nivel de sellos remotos
2	LD291	M4 y M3	Transmisores de presión de Vapor
4	Válvulas	3 Mariposa y 1 de globo	Válvulas reguladoras de flujo con actuadores electro-neumáticos
1	Peachimetro	873APH-AIPCGZ	Transmisor de ph
1	Termómetro	TT-424	Transmisor de temperatura

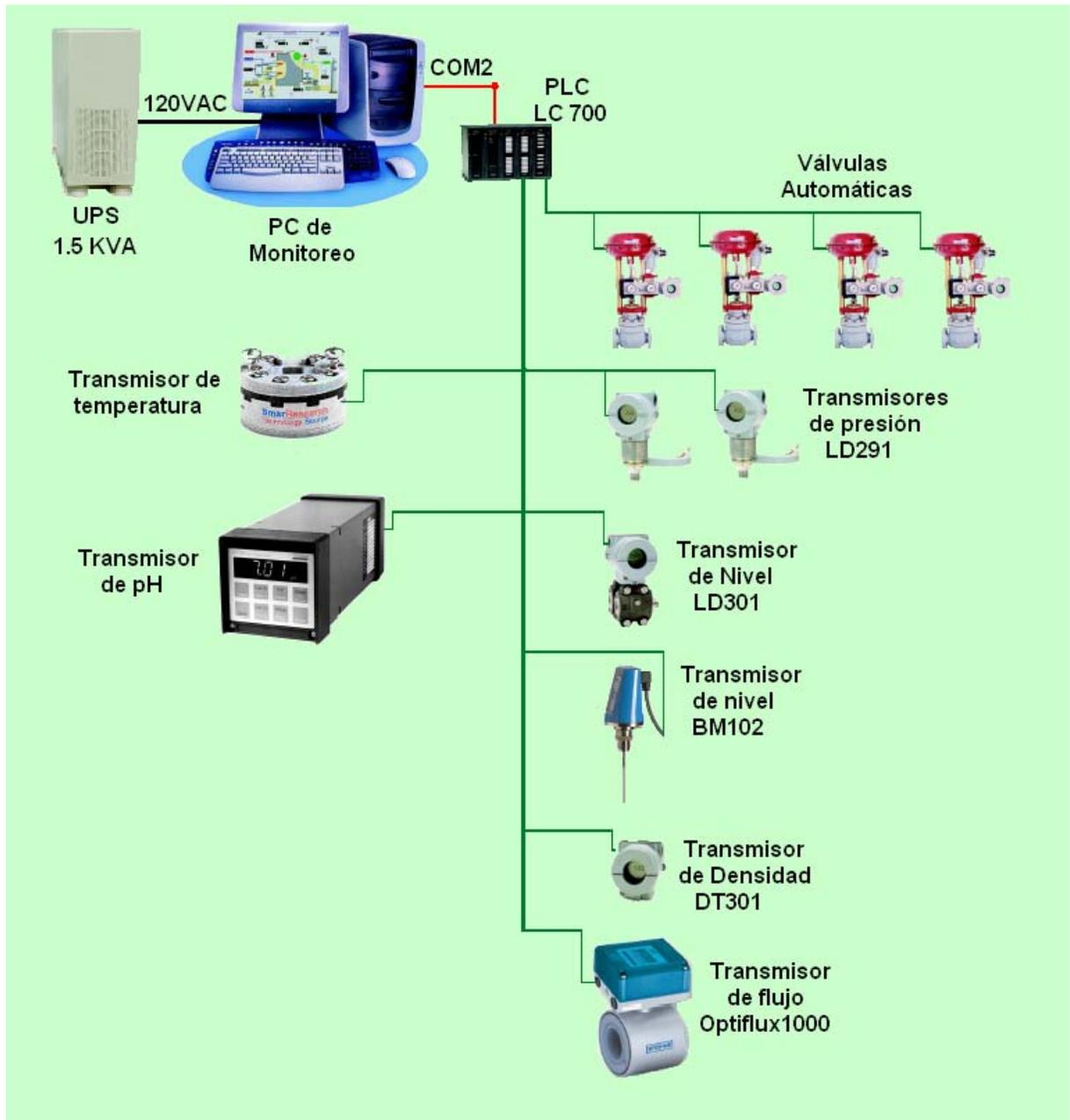


Figura 4.1 Hardware utilizado en la automatización de evaporadores [Ref.6]

4.2 PLC (LC-700).

4.2.1 Descripción general.

El PLC se encuentra constituido por un Rack de cuatro Slots, una fuente de poder, el CPU, un módulo de ocho entradas analógicas y un módulo de cuatro salidas analógicas.

Como unidad de control se utiliza el CPU-700-E3 de SMAR, provisto con una memoria para programa del tipo no volátil de 52 Kbytes, tres puertos de comunicación independientes, además cuenta con 1024 entradas/salidas analógicas y 1024 entradas/salidas discretas. En la figura 4.2 se muestra un diagrama en el que se indica la ubicación del CPU y sus demás accesorios a lo largo del rack de montaje y en la figura 4.3 se muestra el PLC instalado en la planta.



Figura 4.2 Diagrama de la ubicación del CPU en el rack de montaje [Ref. 6]



Figura 4.3 PLC LC-700 instalado para el control automático de evaporadores.

Al módulo de entradas se conecta cada uno de los transmisores ubicados en el proceso. En la tabla 4.2 se tabula la posición que ocupa cada transmisor.

Tabla 4.2 Ubicación de los transmisores en el módulo de entrada M-401-DR.

Canal	Transmisor asociado
CH0	Transmisor de Brix de meladura.
CH1	Transmisor de nivel del primer pre-evaporador.
CH2	Transmisor de flujo de jugo claro.
CH3	Transmisor de presión alta (presión de calderas).
CH4	Transmisor de presión baja (presión de escape de molinos).
CH5	Transmisor de nivel de tanque de jugo claro.
CH6	Transmisor de ph de meladura clarificada.
C7H	Transmisor de temperatura de meladura.

La unidad de control tiene a su cargo el posicionamiento de las válvulas, por lo tanto requiere de una interfaz que comunique el CPU y el actuador electro-neumático de las válvulas. En este caso se utiliza un módulo M-501 provisto de cuatro salidas analógicas de 4-20 mA distribuidas tal y como se muestra en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Distribución de las salidas del módulo M-501.

Canal	Válvula asociada
I0	Actuador de la válvula de meladura
I1	Actuador de la válvula de jugo claro
I2	Actuador de la válvula de vapor de relleno.
I3	Actuador de la válvula de vapor del calentador

4.2.2 Comunicación.

El LC-700 se comunica con una computadora por medio de un puerto modbus RTU (RS-232) con velocidad de transferencia de datos programable entre 1200 bits/s y 57.6 Kb/s, en este caso se programa el CPU para que mantenga la comunicación a 9600 bps ya que es una velocidad aceptable para el volumen de datos que se maneja. En la figura 4.4 se muestra el diagrama de conexión para la comunicación entre el CPU y la PC.

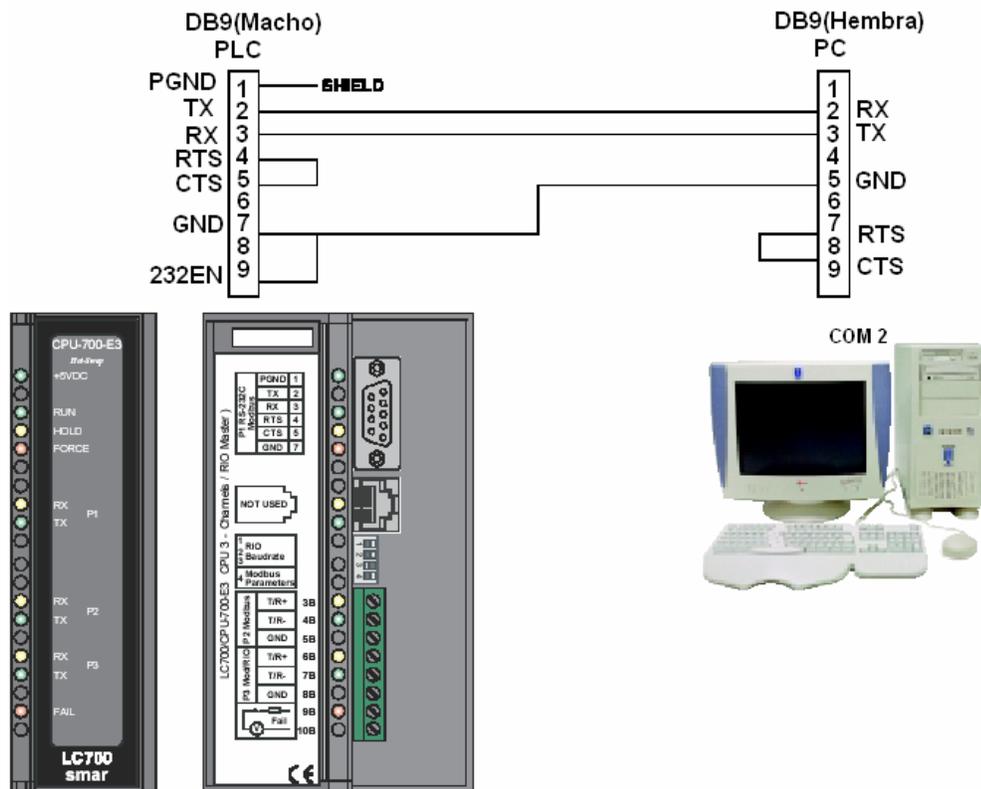


Figura 4.4 Diagrama de la conexión entre el CPU y la PC [Ref. 6]

4.2.3 Configuración.

El CPU se programa con la ayuda del software Conf700 suministrado por el fabricante del equipo. Primero se crea un archivo con la configuración deseada, luego se descarga al PLC a través de un cable serial conectado a cualquiera de los puertos serie de la computadora, una vez descargado se puede monitorear en tiempo real los valores de las variables y realizar correcciones al programa. Posteriormente con la ayuda del software TagList Generator se genera el "TagList" o lista de direcciones que será utilizada por el OPC Server instalado en la PC.

4.3 Computadora.

4.3.1 Descripción general.

Para el control, despliegue y almacenaje de la información recopilada por los sensores se utiliza una computadora, se le programan varias interfaces gráficas HMI (interfaz humano máquina por sus siglas en inglés) diseñadas especialmente para esta aplicación.

La PC se utiliza para ajustar los valores deseados de los Set Point de las variables que lo requieren y los muestra en una pantalla gráfica junto a los demás datos del proceso. Con ayuda de la computadora el operador puede seleccionar entre un control automático o manual, en el control automático el sistema es capaz de regular y ajustar las salidas por si mismo, mientras que en el control manual el operador debe ajustar las salidas a los valores que considere adecuados para el correcto funcionamiento de los evaporadores.

La computadora funciona también como unidad de almacenamiento de información ya que se le programaron dos reportes de históricos, estos históricos se encargan de generar diariamente dos archivos de excel, en estos archivos se guardan los valores de las principales variables de proceso. Para la correcta operación de los programas requeridos se utiliza una computadora con las siguientes características.

A nivel de software:

- Sistema operativo: Windows XP.
- Programas: Microsoft Office 2000 (que incluya Excel y Access), Génesis 32 Enterprise Edition, Tag List Generator V8.54 y LC700 OPC Server, Conf700 v8.54 y Conf401 versión 3.37.

A nivel de hardware:

- Computadora: PC con procesador Pentium de 3.20 GHz.
- Disco duro: 80 Gbytes.
- Memoria RAM: 512 Mbytes.

4.3.2 Comunicación.

La PC se comunica con el CPU a través del puerto serial COM2 a una velocidad de 9600 bps, para el detalle de la conexión refiérase a la figura 4.4.

4.4 Transmisor de nivel por radar de onda guiada (BM-102).

4.4.1 Descripción general.

Como transmisor de nivel de jugo en los evaporadores se utiliza el BM-102, basado en la tecnología radar de onda guiada. Esta forma de medición se escogió como mejor opción después de analizar las condiciones térmicas y químicas de las sustancias involucradas en el proceso de evaporación. En el caso del jugo, este entra al evaporador con una temperatura cercana a los 100 °C, por otra parte en los ciclos de limpieza se utiliza ácido clorhídrico disuelto lo cual representa una amenaza corrosiva para cualquier equipo en contacto con el químico. Por la tecnología de medición el BM-102 se encuentra en capacidad de operar bajo estas condiciones lo cual lo hace idóneo para la aplicación, ver figura 4.5.



Figura 4.5 Transmisor de nivel BM-102.

Este transmisor posee la característica de proporcionar una medida independiente de las variaciones de temperatura, presión y densidad, lo cual le permite determinar con gran precisión el nivel de jugo presente en la calandria del evaporador. Opera bajo el principio TDR (Time domain reflectometry), enviando micropulsos que viajan a lo largo de la guía de prueba a la velocidad de la luz. El pulso es emitido por el instrumento y guiado a través de la línea de prueba, en la superficie del producto, en este caso jugo, se produce una reflexión que regresa al instrumento.

La distancia entre el flange de conexión y la superficie del producto es proporcional al tiempo transcurrido entre la emisión del pulso y el momento en que se recibe la reflexión, se encuentra dado por la ecuación 4.1, en la figura 4.6 se muestra gráficamente los momentos en los que se producen las reflexiones a lo largo de la línea de prueba.

$$D = \frac{c_0 t}{2} \quad 4.1$$

donde:

D = distancia en metros

c_0 = velocidad de la luz en el aire en metros por segundo.

t = tiempo transcurrido en segundos.

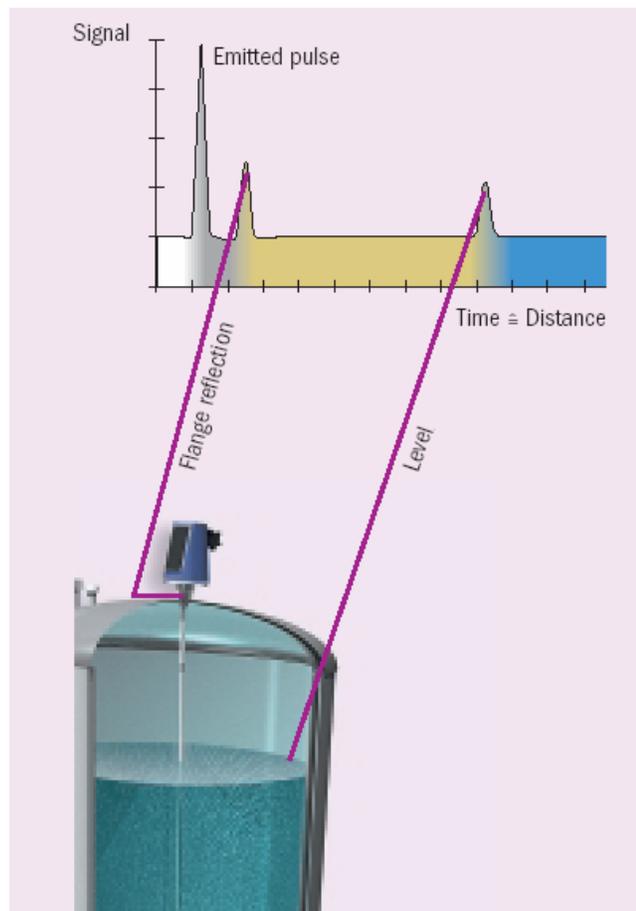


Figura 4.6 Funcionamiento teórico del BM-102 [Ref. 10].

Cuando este pulso llega al flange de conexión se produce el primer reflejo, posteriormente, al llegar a la superficie del líquido se da el segundo reflejo, tal como se muestra en la figura 4.7. Como la velocidad a lo largo de la guía es uniforme, por medio de un cálculo indirecto es posible transformar el tiempo transcurrido entre ambos pulsos en la medida del nivel del evaporador.

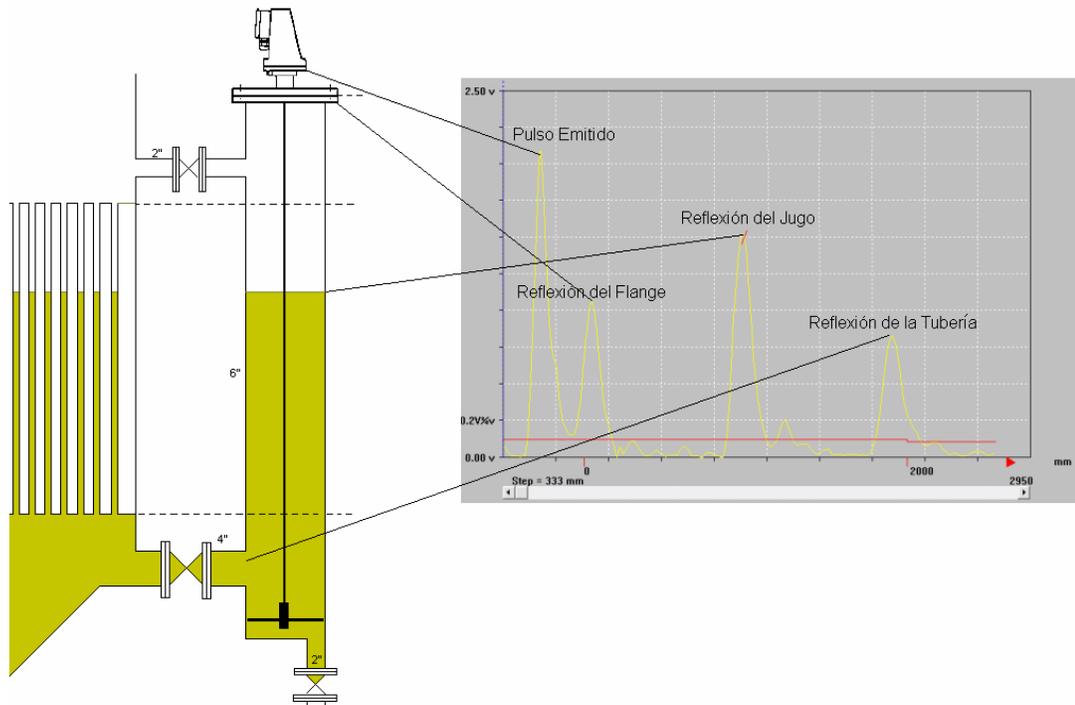


Figura 4.7 Pulsos eléctricos emitidos y recibidos por el BM-102.

4.4.2 Calibración.

Par la calibración se utiliza una interfaz USB a HART conectada a la PC y con la ayuda del programa PCSTAR2 se descargan los parámetros requeridos por el transmisor. También se utiliza una Palm conectada a un configurador HART, en la Palm se debe instalar el programa HPC301 con la ayuda del cual se establece la comunicación con el transmisor.

El protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer) se presenta como una solución para la comunicación de instrumentos inteligentes, compatible con la comunicación analógica de 4-20 mA, es así como las señales analógicas y digitales son transmitidas en forma simultánea sobre el mismo cableado sin perturbar la señal 4-20mA. Con la ayuda de este sistema la señal primaria es transmitida por medio de la señal analógica de 4-20mA, mientras la señal digital puede ser utilizada para la transmisión de otro tipo de información. Para las aplicaciones del proyecto la señal digital se utiliza en la calibración, configuración y diagnóstico de los equipos.

El protocolo HART utiliza el estándar Bell 202 FSK (Frecuency Shift Keying o Codificación por Cambio de Frecuencia) para superponer las señales de comunicación digital a la señal de corriente de 4-20mA, como la señal AC superpuesta tiene un valor promedio de cero, no se afecta la señal de corriente directa, tal como se muestra en la figura 4.8.

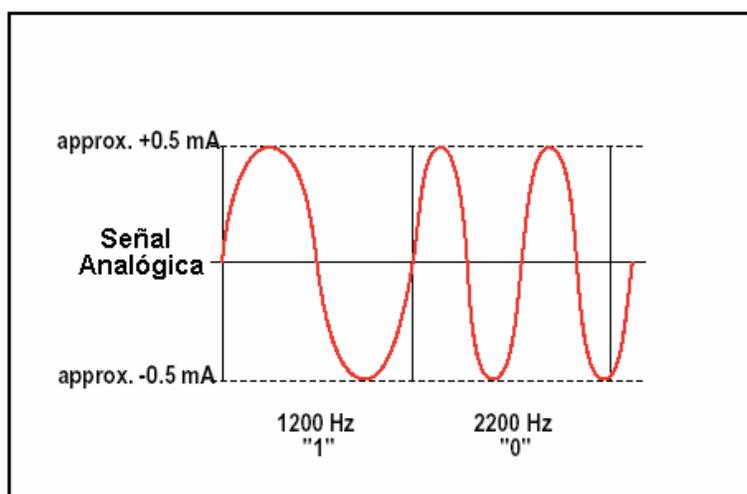


Figura 4.8 Comunicación analógica + digital en forma simultanea [Ref.11]

Bajo el protocolo HART la información binaria es representada por medio de una señal de dos frecuencias distintas, una señal de 1200 Hz corresponde a un "1" lógico y una de 2200 Hz a un "0" lógico. Los datos se transmiten a una velocidad de 1200 bits/s, en la figura 4.9 se muestra la forma de comunicar el código binario 100110110.

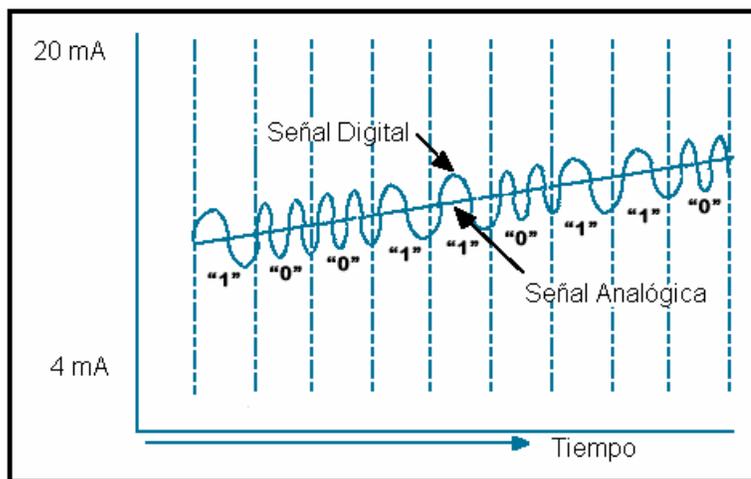


Figura 4.9 Comunicación HART superpuesta a la señal analógica de corriente [Ref.12]

Para poder establecer una comunicación bajo el protocolo HART se deben respetar algunas condiciones, especialmente la tensión aplicada al transmisor y la carga total, en la figura 4.10 se muestra un diagrama donde se indica claramente los rangos permitidos para lograr una comunicación estable.

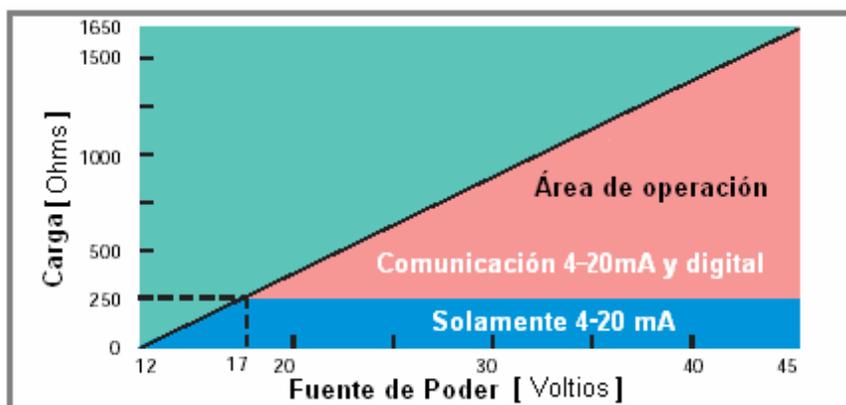


Figura 4.10 Recta de carga para establecer una comunicación 4-20mA [Ref. 7]

4.4.3 Comunicación.

Este transmisor de nivel se comunica con el módulo M-401 por medio de una señal analógica de 4-20 mA proporcional al nivel de jugo presente en la calandria del evaporador. Es así como una señal de 4 mA corresponde al nivel 0 % y una señal de 20 mA va a ser interpretada por el sistema como el nivel 100%.

4.5 Transmisor de densidad (DT301I-1IS-101-51).

4.5.1 Descripción general.

Para la medición de densidad en procesos continuos, se encuentran disponibles muchos métodos de medición, basados en diferentes tecnologías, sin embargo, el DT301 de SMAR es el único transmisor de densidad disponible en el mercado que puede utilizarse en tanques o en línea, alimentado por el lazo de 4-20mA, con indicación local y retransmisión del valor de densidad en unidades configurables por el usuario (g/cm^3 , °Brix, etc.).

Para la determinación del Brix de la meladura se utiliza el DT301 por ser un instrumento desarrollado para ser instalado directamente en el proceso, lo cual permite una lectura en tiempo real de la densidad de meladura. Su tecnología de medición consiste en un sensor de presión diferencial tipo capacitivo comunicado mediante capilares con dos diafragmas inmersos en el proceso, separados por una distancia fija. De esta forma la presión diferencial sobre el sensor será directamente proporcional a la densidad del líquido en el que se encuentre inmerso. Además cuenta con un sensor de temperatura colocado entre los diafragmas, usado internamente para compensar las variaciones de temperatura presentadas por el fluido. En la figura 4.11 se muestra el DT-301 instalado en la planta.



Figura 4.11 Transmisor de densidad DT-301 instalado para medir el Brix de la meladura.

El sensor de presión diferencial se encuentra constituido por una celda capacitiva como la mostrada en la figura 4.12, donde:

P_1 = Presión aplicada a la cámara H.

P_2 = Presión aplicada a la cámara L.

CH = capacitancia entre la placa fija ("fixed plate") sobre la que se aplica P_1 y el diafragma sensor.

CL = capacitancia entre la placa fija sobre la que se aplica P_2 y el diafragma de sensor.

d = distancia entre las placas fijas CH y CL.

Δd = deflexión del diafragma debido a la presión del diferencial $\Delta P = P_1 - P_2$

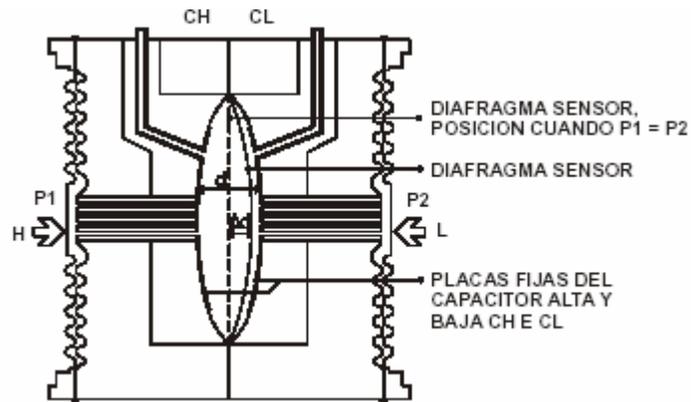


Figura 4.12 Celda capacitiva utilizada por el transmisor DT-301 [Ref. 7]

La capacitancia de un condensador de placas planas y paralelas puede ser expresada en función del área de la placa y la distancia entre placas, tal como se muestra en la ecuación 4.2.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad 4.2$$

donde:

ϵ = constante dieléctrica del medio entre ambas placas.

A = área de la placa.

d = distancia entre placas.

Si CH y CL son consideradas como capacitancias de las placas planas y paralelas con áreas idénticas se obtienen las ecuaciones 4.3 y 4.4

$$CH = \frac{\epsilon \cdot A}{\frac{d}{2} + \Delta d} \quad 4.3$$

$$CL = \frac{\epsilon \cdot A}{\frac{d}{2} - \Delta d} \quad 4.4$$

Sin embargo, si la presión diferencial ΔP aplicada a la celda capacitiva no desvía el diafragma de sensado en más de $d/4$, es posible asumir que ΔP es proporcional a Δd esto sería:

$$\Delta P \propto \Delta d \quad 4.5$$

Al desarrollar la expresión $(CL-CH)/(CL+CH)$, se deduce que:

$$\Delta P = \frac{CL - CH}{CL + Ch} = \frac{2\Delta d}{d} \quad 4.6$$

Como la distancia (d) entre las placas es constante, de esta forma es posible concluir que la expresión $(CL-CH)/(CL+CH)$ es proporcional a Δd y, por consiguiente a la presión diferencial a medir.

Con esto es posible concluir que la celda capacitiva es un sensor de presión con dos condensadores variando su capacitancia de acuerdo a la presión diferencial aplicada.

4.5.2 Calibración.

Para la calibración se utiliza una Palm a la cual se le conecta un configurador HART, en la Palm se instala el programa HPC301 con la ayuda del cual se establece la comunicación con el transmisor. El rango de calibración es de 40 a 70 ⁰Brix.

4.5.3 Comunicación.

Se comunica con el módulo M-401 por medio de una señal analógica de 4-20 mA proporcional a la densidad de la meladura. Transmitiendo una señal de 4 mA cuando la meladura se encuentra a 40 ⁰Brix y una señal de 20 mA para 70 ⁰Brix.

4.6 Transmisor de flujo (Optiflux1000).

4.6.1 Descripción general.

Una de las consideraciones más importantes planteadas en la automatización de evaporadores es la de tratar de mantener un flujo de jugo estable en la entrada del tren de evaporación. Para medir el flujo de entrada se escogió un transmisor tipo electromagnético Optiflux1000 ya que es un equipo capaz de medir y transmitir el flujo en forma continua y se encuentra diseñado para trabajar a temperaturas de proceso de hasta 150 °C, en la figura 4.13 se muestra el montaje del transmisor.



Figura 4.13 Montaje del transmisor de flujo Optiflux1000.

El método de medición se basa en la ley de Faraday la cual establece que la tensión inducida a través de cualquier conductor, cuando este se mueve perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor.

La formula del caudal que da la ley de Faraday es la siguiente:

$$E_s = KBlv \quad 4.6$$

donde:

E_s = tensión generada en el conductor.

K = constante.

B = densidad de campo magnético.

l = longitud del conductor.

v = velocidad del movimiento.

En el medidor de flujo o caudal el conductor es el líquido y E_s es la señal generada, esta señal es captada por dos electrodos diametralmente opuestos y ubicados en forma rasante a la superficie interna del tubo tal como se muestra en la figura 4.14.

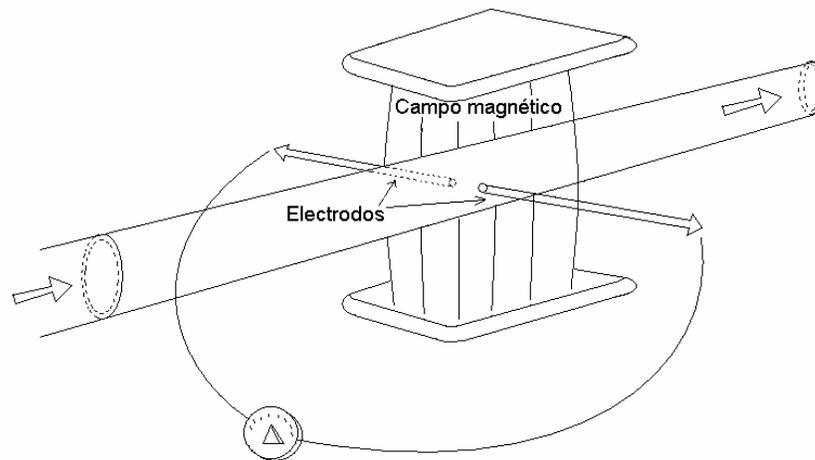


Figura 4.14 Principio de medición del transmisor de flujo electromagnético.

Analizando la figura anterior se puede ver que la única zona del líquido en movimiento que contribuye a la f.e.m es la que une en línea recta a los dos electrodos.

4.6.2 Calibración.

El Optulux 1000 es calibrado en la fábrica en el rango comprendido entre los 0 y los 300 galones por minuto, por lo que requirió ser calibrado nuevamente al rango de 0 a 1000 galones por minuto. Para la calibración se utiliza una interfaz USB a HART encargada de comunicar la PC con el transmisor, en la PC se utiliza el software Conf401.

4.6.3 Comunicación.

El optiflux1000 genera una señal analógica de corriente de 4-20 mA proporcional al flujo de jugo medido, en este caso una señal de 4 mA implica la no existencia de flujo en la tubería y una señal de 20 mA corresponde a un flujo máximo de 1000 GPM.

4.7 Transmisor de nivel (LD301L).

4.7.1 Descripción general.

Para medir el nivel del tanque de jugo claro se requiere un transmisor capaz de soportar las altas temperaturas del líquido (alrededor de 100 °C), como se trata de un tanque abierto a la atmósfera, se recurrió a la utilización de un transmisor de presión LD301L de la marca SMAR. Este transmisor genera una señal de 4-20 mA proporcional a la presión aplicada. Como existe una relación de proporcionalidad entre la presión y el nivel de jugo contenido en el tanque, se puede tomar la señal de presión e interpretarla como una señal de nivel, en la figura 4.15 se muestra la ubicación del transmisor en el tanque de jugo claro.



Figura 4.15 Montaje del transmisor LD-301 en el tanque de jugo claro.

Para determinar el nivel se utiliza un diafragma en contacto con el líquido del tanque, encargado de medir la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque (ver figura 4.16). En un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico, es decir:

$$P = H\gamma g \quad 4.7$$

Donde:

P= presión

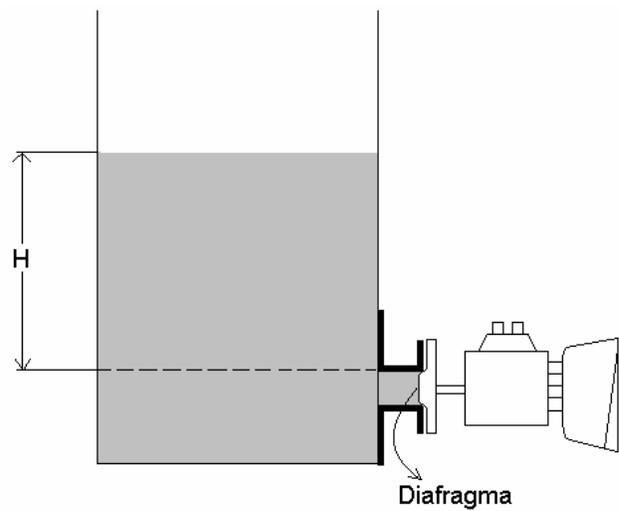
H = altura del líquido sobre el instrumento

γ = densidad del líquido

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$



(a) Fotografía



(b) Diagrama

Figura 4.16 Ubicación del diafragma en el tanque.

4.7.2 Calibración.

La calibración se realiza con la ayuda de un configurador HART adaptado a una Palm. El rango calibrado va desde los 0 a los 3000 mmH₂O a 20 °C. La diferencia que existe entre la densidad del agua a 20 °C y el jugo a 100 °C no es representativa para este tipo de medición.

4.7.3 Comunicación.

Se comunica con el módulo M-401 por medio de una señal analógica de 4-20 mA proporcional al nivel medido, 4 mA corresponden al nivel 0% y 20 mA corresponden al 100%.

4.8 Transmisores de presión (LD291).

4.8.1 Descripción general.

Para lograr tener control sobre la presión del vapor de escape que ingresa a los pre- evaporadores se requieren dos señales, la presión de vapor de escape de las turbinas y el turbogenerador (cabezal de baja) y la presión del vapor de calderas (cabezal de alta). Para la medición y transmisión de las señales de presión se utilizan transmisores LD291 de SMAR (figura 4.17). Estos transmisores se conectan a las líneas de vapor por medio de tuberías de 0.5 pulgadas colocados de tal forma que permitan la formación de una columna de condensado (agua), de esta forma el vapor ejerce presión sobre el agua y el agua sobre el sensor del transmisor mejorando la estabilidad de la medición. Estos transmisores utilizan sensores de celda capacitiva como el mostrado en la figura 4.18, su funcionamiento es similar al del DT301 descrito anteriormente.



Figura 4.17 Transmisor de presión LD-291[Ref.8]

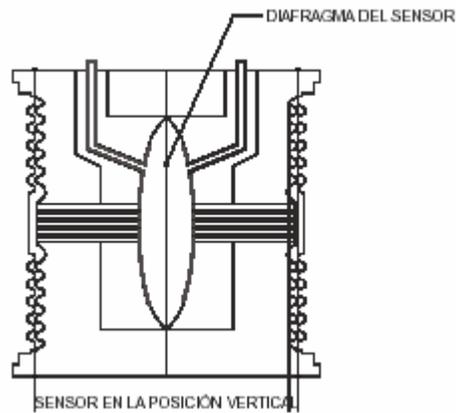


Figura 4.18 Celda capacitiva utilizada por los transmisores LD291 [Ref. 8]

4.8.2 Calibración.

Para la calibración se utiliza una Palm conectada con un configurador HART. El transmisor de alta presión se calibró en el rango comprendido entre las 0 psi y las 300 psi y el de baja entre los 0 psi y 30 psi.

4.8.3 Comunicación.

Se comunican con el módulo de entrada de datos M-401 por medio de una señal analógica de 4-20 mA proporcional a la presión aplicada.

4.9 Válvulas para control.

Para la regulación del flujo de jugo, meladura y la cantidad de vapor que se inyecta a los calentadores de meladura se utilizan válvulas tipo mariposa con disco excéntrico y actuadores electro-neumáticos con comunicación 4-20 mA proveniente del módulo de salidas (M-501), y con ayuda de un transductor interno la convierten en una señal neumática. Esta señal neumática es la encargada de realizar el posicionamiento de la válvula. Se programaron dos formas para controlar las válvulas, lo puede hacer el sistema de control automática o el operador en forma manual desde la computadora de control, esta decisión se encuentra a cargo del operador del sistema. Para la regulación del vapor de relleno se utiliza una válvula tipo globo con un actuador electro-neumático con señal eléctrica de entrada de 4 a 20 mA. En la figura 4.19 se muestra una de las cuatro válvulas utilizadas en el proyecto.



Figura 4.19 Válvula electro-neumática instalada para la regulación del flujo de meladura.

4.10 Transmisor de pH (873APH).

4.10.1 Descripción general.

Como una expansión a los alcances del proyecto se consideró la necesidad de monitorear desde la PC el pH de la meladura clarificada. Para lograrlo se utiliza un transmisor de pH modelo 873APH de la marca Foxboro, a este transmisor se le conectan dos sensores, uno de pH y otro de temperatura, el sensor de temperatura es indispensable ya que permite al transmisor realizar una compensación al pH medido, minimizando los errores introducidos en la medición como consecuencia de variaciones en la temperatura de la meladura. Para la medición del pH se toma una muestra de meladura y se hace pasar en forma continua por un sistema de rebalse de tal forma que la punta de prueba (que contiene ambos sensores) siempre se encuentra en contacto con la meladura. El montaje de los sensores se muestra en la figura 4.20.



Figura 4.20 Montaje del sensor de pH.

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del agua con compuestos químicos disueltos. Su expresión se encuentra dada por el algoritmo de la inversa de la concentración del ion H^+ expresada en moles por litro.

$$pH = \log \left[\frac{1}{[H^+]} \right] \quad 4.8$$

Por esta razón el agua pura neutra con una concentración de ion hidronio de 10^{-7} moles por litro tiene un pH de 7.

$$pH = \log \left[\frac{1}{[10^{-7}]} \right] = 7 \quad 4.9$$

El método que utiliza este transmisor para medir el pH se basa en la utilización de un electrodo de vidrio. El electrodo consiste en un tubo de vidrio cerrado en su parte inferior con una membrana de vidrio especialmente sensible a los iones hidronio del pH. En la parte interna de la membrana se coloca una solución de cloruro tampón de pH constante dentro de la cual se encuentra inmerso un hilo de plata recubierto de cloruro de plata.

A pesar de que el mecanismo por medio del cual el electrodo mide la concentración del ion hidronio no es exactamente conocido, está comprobado que al introducir el electrodo en el líquido se desarrolla un potencial directamente proporcional a la concentración del ion hidronio presente en el líquido.

4.10.2 Calibración.

La calibración se realiza manualmente conectando los sensores de pH y temperatura al transmisor, una vez conectados los sensores y alimentado el transmisor se requiere de dos muestras de líquidos con pH conocidos una de 4.0 y otra de 7.0 (estas sustancias van a servir como patrones de medición por lo tanto el pH reportado debe coincidir en forma exacta para cada muestra). Primero es importante verificar el funcionamiento del sensor de temperatura, luego se introduce la punta de prueba en la muestra con pH 4.0, se verifica la medición y de no ser correcta se corrige con la ayuda de los botones de la parte frontal del equipo (ver figura 4.21); posteriormente se lava la punta con agua destilada y se repite el procedimiento para la muestra de pH 7.0.



Figura 4.21 Indicador local del 873APH.

4.10.3 Comunicación.

Este transmisor posee la capacidad de comunicarse por medio de una señal analógica de 4-20 mA proporcional al pH medido, es así como una señal de 4 mA es equivalente a un pH de 0 y 20 mA corresponden a un pH de 14. Este equipo se encuentra conectado a la entrada seis del módulo de entrada de datos M-401-DR.

4.11 Transmisor de temperatura (TT421)

4.11.1 Descripción general.

Para lograr controlar la temperatura de la meladura que ingresa al clarificador se requería un instrumento capaz para medir la temperatura y transmitirla por medio de una señal de 4-20mA. El transmisor de temperatura TT421 (figura 4.22) se instala junto con una RTD directamente en la tubería de salida de los calentadores.



Figura 4.22 Transmisor de temperatura TT421 [Ref. 9]

La RTD es un sensor de temperatura del tipo resistivo, (en el montaje se garantiza el contacto permanente del sensor con el fluido) además cuenta con una conexión de tres líneas tal como se muestra en la figura 4.23, la entrada tres del transmisor es de muy alta impedancia, por lo tanto no fluye corriente por este cable, lo cual garantiza que no exista caída de tensión. De esta forma el diferencial de tensión $V_2 - V_1$ es independiente de la resistencia de los cables, y proporcional a resistencia de la RTD.

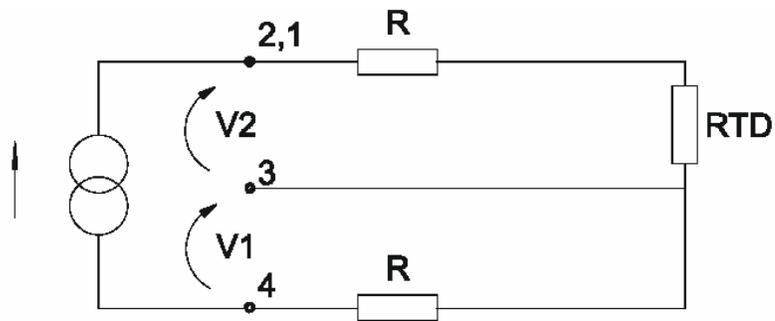


Figura 4.23 Conexión de tres líneas [Ref. 9]

$$V_2 - V_1 = [RTD + R] * i - r * i = RTD * i \quad 4.10$$

4.11.2 Calibración.

Para la calibración se utiliza un configurador HART adaptado a una Palm. El transmisor se calibra para trabajar en el rango de 20 °C a 95 °C.

4.11.3 Comunicación.

Se comunica por medio de una señal analógica de 4-20 mA proporcional al a la temperatura medida, es así como una señal de 4 mA es equivalente a 20 °C y 20 mA corresponden a 95 °C. El transmisor de temperatura encuentra conectado a la entrada siete del módulo de entrada de datos M-401-DR.

CAPITULO 5

5 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO.

5.1 Configuración del PLC.

5.1.1 Aspectos generales.

Para la configuración del PLC se utiliza el software Conf700 provisto por SMAR como fabricante del equipo. La configuración abarca cinco lazos de control independientes a saber: control del Brix de meladura en la salida de los evaporadores, control del nivel de jugo en la calandria de los vasos, control del flujo de jugo claro que ingresa al primer pre-evaporador, control del vapor de relleno y control de temperatura de meladura. Además, se programaron totalizadores y alarmas de operación.

En el caso de los reguladores se utilizan PI principalmente por tratarse de sistemas o procesos lentos en los que basta con la aceleración suministrada por la ganancia proporcional para lograr la respuesta requerida para un funcionamiento aceptable de los lazos de control.

A continuación se citan algunas características de funcionamiento de evaporadores consideradas a la hora de diseñar la estrategia de control:

- a. Pequeñas variaciones de nivel producen grandes variaciones en el área total de evaporación.
- b. El brix de jugo claro de entrada presenta variaciones, entre los 13 y 18 °Brix.
- c. La temperatura del jugo claro de entrada no es constante, varía aproximadamente entre los 90 y 100 °C.

- d. La presión de vapor de escape utilizado por el primer efecto presenta fluctuaciones provocando cambios en el punto de ebullición y el nivel de jugo.
- e. Se presentan variaciones en el vacío del último efecto, provocadas principalmente por los cambios en la presión del agua utilizada.
- f. La operación discontinua de los tachos produce variaciones en la presión de vapor vegetal que alimenta el segundo efecto (8 psi), provocando una reacción en cadena que altera los puntos de ebullición del jugo contenido en los siguientes vasos.
- g. Los evaporadores disminuyen su eficiencia rápidamente, por lo que requieren ser limpiados cada 15 días.
- h. Por lo delicado y peligroso de la actividad la experimentación tiene que ser estrictamente controlada.
- i. Todas las variables deben permanecer entre los rangos de operación permitidos, aún durante el periodo de experimentación, ya que salirse de estos rangos implica un gran riesgo para los equipos y el personal de la planta.

Para la selección del tipo de reguladores a utilizar se realizó un análisis de los requerimientos de control y el funcionamiento del proceso de evaporación. Por tratarse de procesos lerdos en los que se debía contemplar la necesidad de no sobrepasar offset previamente establecidos, se consideró como mejor opción utilizar compensadores tipo PI, este tipo de regulador permite la posibilidad de controlar tanto el sobreimpulso como el tiempo de estabilización de la variable controlada.

En primera instancia se consideró la posibilidad de utilizar en la determinación de los parámetros de los compensadores PI (K_P y T_R) el método de ganancia límite de Ziegler-Nichols utilizado por muchos de los reguladores con ajuste automático o “auto-tuning”, sin embargo, este método podía llevar las variables de proceso a valores extremos, poniendo en riesgo los equipos, la calidad del producto, la continuidad del proceso y el personal, por lo que el ajuste no se realizó de esta forma.

Ante lo delicado y riesgoso de la experimentación se decidió programar un sistema de control manual desde la PC, este tipo de control permite dos ventajas, sirve como apoyo ante la eventual falla de algún instrumento de medición y permite controlar y estabilizar la planta ante la selección de valores incorrectos para los parámetros.

Una vez programados los controles manuales, se conectaron los reguladores a los lazos de control y por medio de experimentos se procedió a determinar los parámetros de ajuste adecuados para el funcionamiento aceptable de los lazos de control. Los experimentos se basaban en el estudio de la respuesta lograda, analizando el comportamiento dinámico del sistema ante perturbaciones y cambios en los valores de referencia o Set Point.

Todas las salidas de los reguladores son determinadas por medio del algoritmo “parallel” de la ecuación 5.1, estas salidas se encuentran conectadas a los actuadores de las válvulas que operan sobre el proceso.

$$PARALLEL = K_p \cdot e + \frac{e}{T_r \cdot s} \quad (5.1)$$

donde:

K_p = ganancia proporcional.

e = Error (diferencia entre el valor de la variable medida y el Set Point).

T_r = Tiempo integral.

Todos los lazos de control implementados se basan en la estructura de regulación presentada en la figura 5.1, es así como la determinación de los parámetros de los reguladores se efectúa para una entrada de referencia constante y tendiente a realizar una compensación de las perturbaciones. En este caso la salida debe mantenerse estable como consecuencia de un valor constante de referencia (Set Point) aún ante la presencia de perturbaciones en el lazo de control.

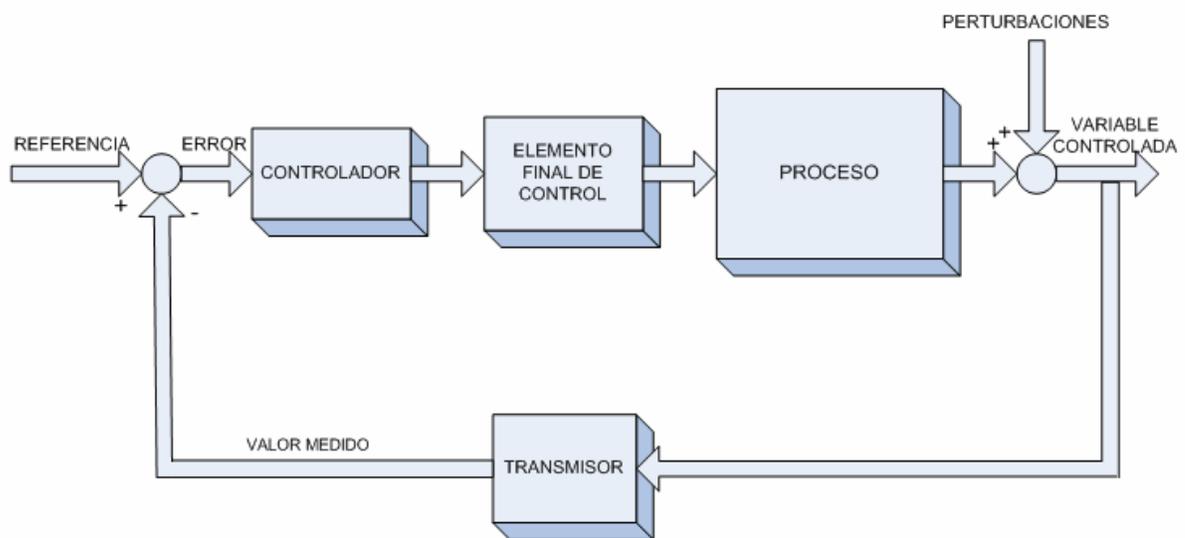


Figura 5.1 Estructura general de los lazos de control.

5.1.2 Lazo de control de Brix de meladura.

Para el control del Brix de la meladura de salida se programa un lazo de control totalmente independiente, este lazo recibe como entrada la señal BT-100 proveniente del módulo de entradas analógicas asociada al transmisor de Brix. Además, captura el valor del Set Point de Brix introducido por el operador mediante escritura directa del registro BC-100SP.PRM1, esta función es representada en la figura 5.2 con el bloque captura de Set Point.

Se configura la opción de seleccionar entre un control automático o manual de la salida BC-100 conectada al módulo de salidas analógicas asociado al posicionador de la válvula de meladura. Si se selecciona el control automático la salida es determinada por el regulador, por el contrario, si el control es manual, la salida es manipulada en forma independiente y se encuentra a cargo del operador. En el control manual el sistema no toma en cuenta ningún tipo de parámetro de operación ya que se escribe directamente sobre el registro de salida del lazo de control.

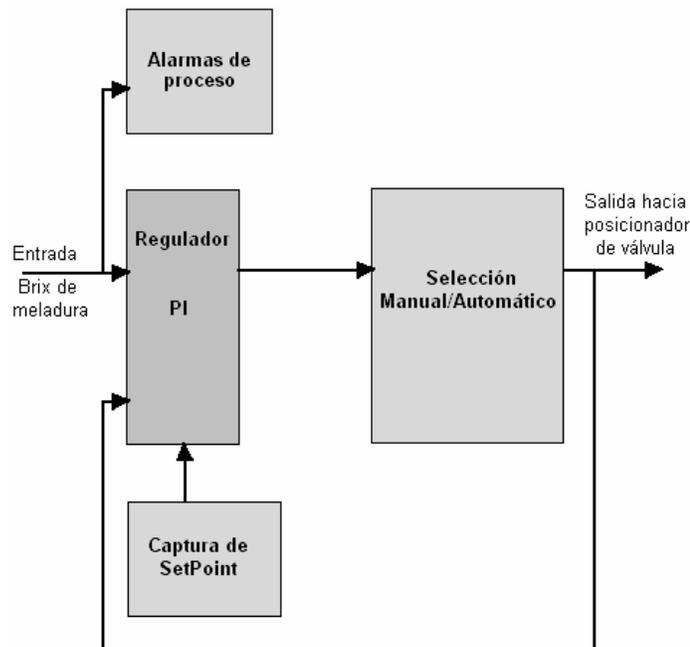


Figura 5.2 Diagrama de bloques del lazo de control de Brix de meladura.

5.1.3 Lazo de control de nivel de pre- evaporadores.

Para lograr un control estricto sobre el nivel de jugo en los pre- evaporadores se programa un lazo de control independiente cuya entrada principal corresponde a la señal LT-101 proveniente del módulo de entradas analógicas asociada al transmisor de nivel de la calandria del primer pre- evaporador. Además, captura el valor del Set Point de nivel y lo almacena mediante escritura directa del registro LC-101SP.PRM1 (ver figura 5.3)

Al igual que el lazo de control de Brix , se proporciona la opción de seleccionar entre un control automático o manual de la señal de salida. Con un control automático el sistema se ajusta solo al Set Point especificado, sin embargo, si se selecciona el control manual la señal de salida pasa a ser controlada en forma completamente independiente por el operador de evaporadores, siendo este el responsable de monitorear las variables asociadas (nivel y flujo de jugo)

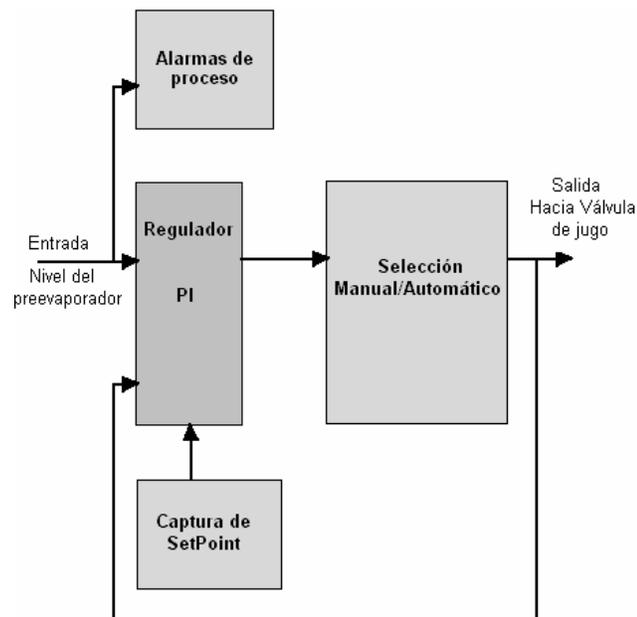


Figura 5.3 Diagrama de bloques del lazo de control de nivel de evaporadores.

5.1.4 Lazo de control de flujo de jugo claro.

Para garantizar la operación eficiente del tren de evaporación se debe mantener la estabilidad del flujo de jugo claro de entrada, para que a su vez se logre estabilidad en la generación de vapor vegetal.

Como entrada del lazo de control se utiliza la señal FT-102 proveniente del módulo de entradas analógicas. Además, el operador puede introducir mediante escritura directa del registro FC-102SP.PRM1 el valor del Set Point deseado, esta función es representada en la figura 5.4 con el bloque captura de Set Point.

Al igual que en los lazos de control descritos anteriormente se programa la opción de seleccionar entre un control automático o manual de la salida EC-102 encargada de controlar el posicionador de la válvula, en este caso la válvula de jugo claro. En automático la señal EC-102 es controlada directamente por el regulador, no obstante, si la selección es manual, el control pasa a manos del operador siendo este el encargado de modificar directamente el registro interno asociado a la salida EC-102 y por ende el posicionamiento de la válvula.

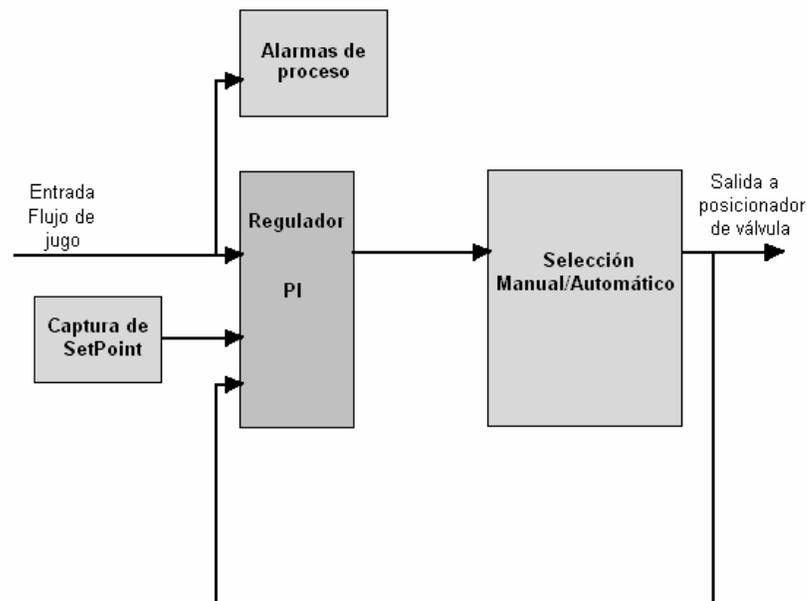


Figura 5.4 Diagrama de bloques del lazo de control de flujo de jugo claro.

5.1.5 Lazo de control de vapor de relleno.

El control de vapor de relleno puede ser considerado como dos lazos de control en uno ya que utiliza dos reguladores, uno recibe como entrada la señal HPT-103 asociada al transmisor de alta presión y el otro la señal LPT-104 asociada al transmisor de baja presión.

La selección del regulador a utilizar se encuentra a cargo del bloque selección del regulador (ver figura 5.5), dependiendo de la lectura del transmisor de alta presión se selecciona entre uno u otro regulador. En caso de existir baja presión en la tubería de alta se activa una señal de alarma encargada de ceder el control al regulador de alta presión, en caso contrario el regulador de baja presión es el encargado de definir la señal de salida PC-103-4.UOT conectada al módulo de salidas analógicas y este a la válvula de vapor de relleno.

El bloque captura de Set Point se encarga de guardar los vapores de las condiciones óptimas de operación, tanto en baja presión como en alta, para lo cual utiliza los registros PC-10SP.PRM1 y PC-10SP.PRM2. Estas señales pueden ser manipuladas por el operador y son transmitidas a los respectivos reguladores.

También en este caso se contempla la opción de controlar la salida tanto en forma manual como automática. Si se selecciona el control manual la salida es manipulada directamente sin que el sistema evalúe las condiciones de operación. En caso contrario si el control es automático, el controlador analiza las condiciones y efectúa las modificaciones en el posicionamiento de la válvula necesarias para lograr los requerimientos fijados por el operador. Cuando la salida es controlada en forma automática se activa un limitador que no permite al sistema de control abrir en más de un 30% la válvula, esto con el propósito de evitar sobrepresiones en la línea de

baja presión previniendo alguna explosión, por otro lado, se garantiza una inyección regulada de vapor evitando bajonazos de presión en la línea de alta, ya que a presiones bajas se puede disparar el turbogenerador obligando a parar la molienda.

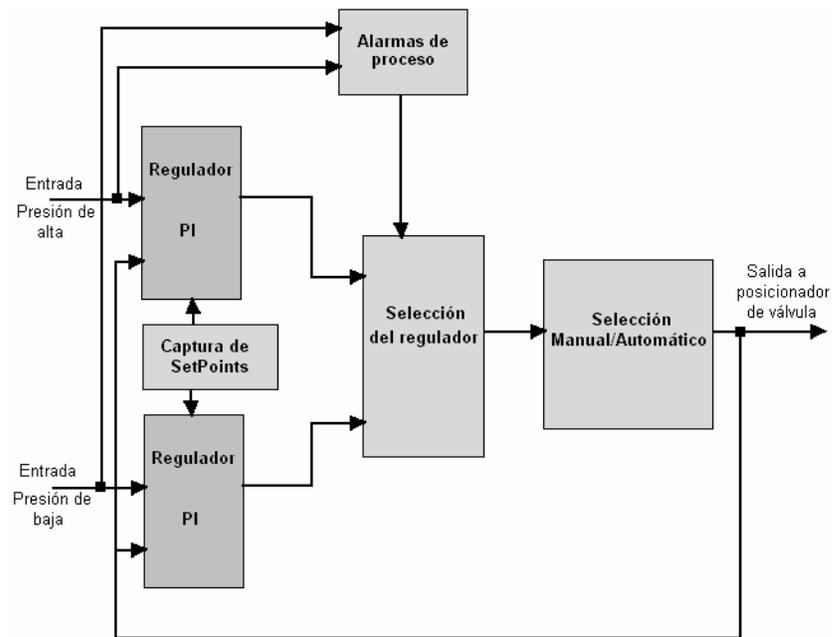


Figura 5.5 Diagrama de bloques del lazo de control de vapor de relleno.

5.1.6 Lazo para control de temperatura de meladura.

La meladura que ingresa al proceso de clarificado debe tener una temperatura estable y cercana a los 80 °C, para alcanzar esta temperatura se hace pasar la meladura por un sistema de calentamiento a base de vapor. A partir de la lectura de temperatura se controla la abertura de la válvula de vapor que alimenta al calentador.

Como entrada para el lazo de control se utiliza la señal TT-107 asociada al transmisor de temperatura. Por otro lado, se programa la opción de modificar el Set Point (registro TC-107SP.PRM1), lo cual ofrece al operador la posibilidad de modificar las condiciones de proceso, función captura de Set Point de la figura 5.6.

También se programa un control manual de la salida TC-107 a través del cual puede deshabilitar el control automático y controlar la válvula en forma remota desde la computadora. En automático la señal TC-107 es controlada por el sistema, encargado de buscar el grado de abertura de la válvula que garantice la temperatura fijada por el operador.

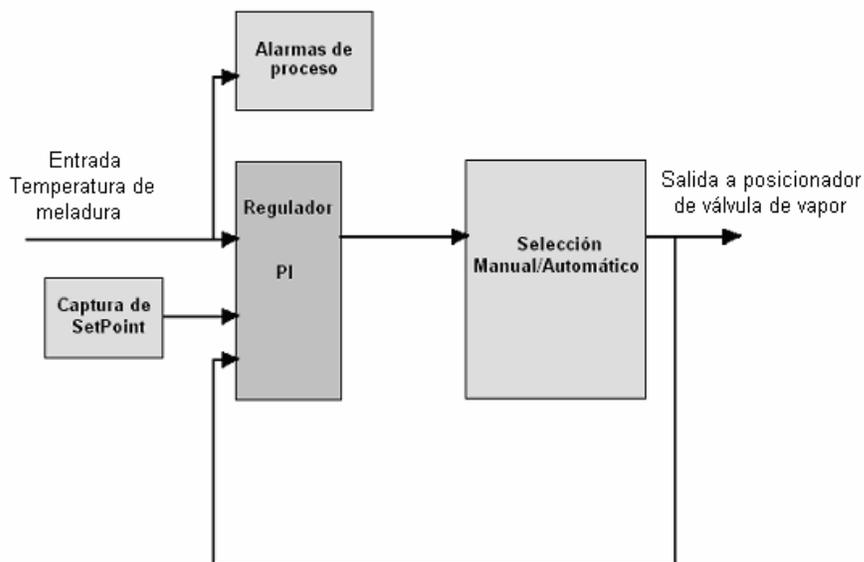


Figura 5.6 Diagrama de bloques del lazo de control de temperatura de meladura.

5.1.7 Alarmas de proceso.

Como ayuda para los encargados de operar los evaporadores se programaron una serie de alarmas de proceso, estas alarmas se activan si los valores de algunas variables se salen de los rangos normales de operación, en caso de sobrepasarse el valor establecido como límite máximo se activa una señal de alarma, en el otro caso extremo si la variable toma valores inferiores al límite mínimo otra alarma distinta se activa. Por ejemplo, si el operador establece que el nivel del tanque de jugo claro debe permanecer entre el 30% y el 80%, en el momento que la señal de nivel se salga de este rango se activará la señal de alarma respectiva.

En la configuración de las alarmas se utiliza un parámetro denominado banda muerta (DB por sus siglas en inglés), este parámetro es de suma importancia ya que determina el margen de valores para los que la señal de alarma se mantendrá activa luego de sobrepasados los límites de operación. En la figura 5.7 se muestra un diagrama con un ejemplo de aplicación del DB en la generación de señales de alarma, en este caso los parámetros BH y BL corresponden a los límites superior e inferior de operación respectivamente, la señal HA se activa una vez superado el valor de BH y permanece en alto hasta que la señal de entrada sea menor que el resultado de restarle al BH la banda muerta configurada. Por otra parte, si la señal de la variable de proceso toma valores inferiores al valor de BL otra señal de alarma se activa, en este caso la señal LA permanecerá activa hasta que la variable de proceso sobrepase a $BL+DB$.

La determinación de la banda muerta es de gran importancia cuando la señal de alarma es utilizada para actuar sobre el proceso, como sucede con la alarma de baja presión en el lazo de control de vapor de relleno. Si no se configura bien el proceso puede entrar en oscilación causando serios problemas.

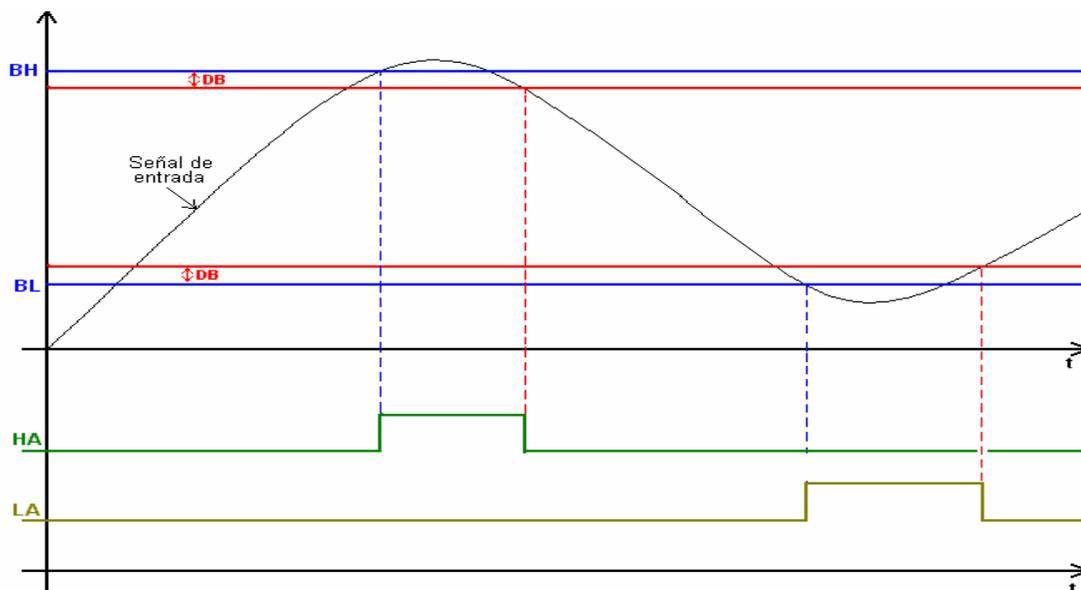


Figura 5.7 Ejemplo de aplicación del DB en la generación de señales de alarma.

5.1.8 Totalizadores.

Para llevar el control de la cantidad de jugo que ingresa al tren de evaporación se programaron totalizadores capaces de cuantificarlo en galones. Un totalizador se encarga de la cantidad de jugo diario y otro del total de galones acumulado durante la zafra, los totalizadores diarios se reinician automáticamente a las 6:00am, como medida de protección de los datos algunas opciones de borrado son protegidas con contraseñas. Para la obtención del dato se integra en el tiempo la variable asociada de la siguiente forma:

$$SALIDA = \int_0^t \frac{FCF}{TU} * IN\%(t)dt \quad 5.2$$

donde:

$$FCF = 1000/10000 = 0.1$$

$$TU = 1$$

Para obtener el total de horas de operación normal y la cantidad de horas perdidas, se programaron cuatro totalizadores, uno se encarga de cuantificar el total de horas diarias en las que el proceso de evaporación se encontró detenido y otro de las horas diarias de operación normal. Por otra parte, los restantes dos totalizadores se encargan del registro del total de horas perdidas u operadas durante toda la zafra. Además se contempla la posibilidad de cuantificar el total de horas perdidas por razones ajenas al funcionamiento de los evaporadores, para esto se utilizaron dos totalizadores más, uno se encarga de llevar el registro del total de horas perdidas por falta de caña y el otro de las horas perdidas por razones especiales.

5.2 Interfaz gráfica con el usuario.

5.2.1 Descripción general.

Como uno de los requerimientos del proyecto se planteo la posibilidad de realizar el monitoreo de las variables involucradas en el proceso de evaporación. Para lograrlo se diseña una interfaz gráfica con ayuda del software GraphWorX32, en esta interfaz se le proporciona al operador la posibilidad de visualizar en el monitor de una computadora todas las variables de proceso, modificar Set Point, seleccionar entre controles manuales o automáticos, controlar válvulas en forma manual, visualizar gráficas de las variables de proceso, modificar parámetros de operación (solo para encargado de instrumentación), entre otros.

5.2.2 Pantalla principal.

Corresponde a la pantalla que ilustra el proceso con todas sus variables, se diseñan los evaporadores como pequeños tanques simulando el nivel por medio de variaciones en el color de fondo de los evaporadores y el tanque de jugo claro. Con la intención de mejorar la interpretación de los datos por parte de los operadores se diseña de tal forma que guarde gran similitud con la distribución de los equipos montada en la planta, logrando una interfaz agradable y de muy fácil interpretación.

En la figura 5.8 se muestra la pantalla principal con las principales variables de proceso, las señales de alarma se configuraron en color blanco sobre rojo y en forma "Flash" (prende y apaga) esto con la intención de lograr la atención del operador una vez activadas. Además se despliegan los datos suministrados por los ocho totalizadores de jugo y tiempo.

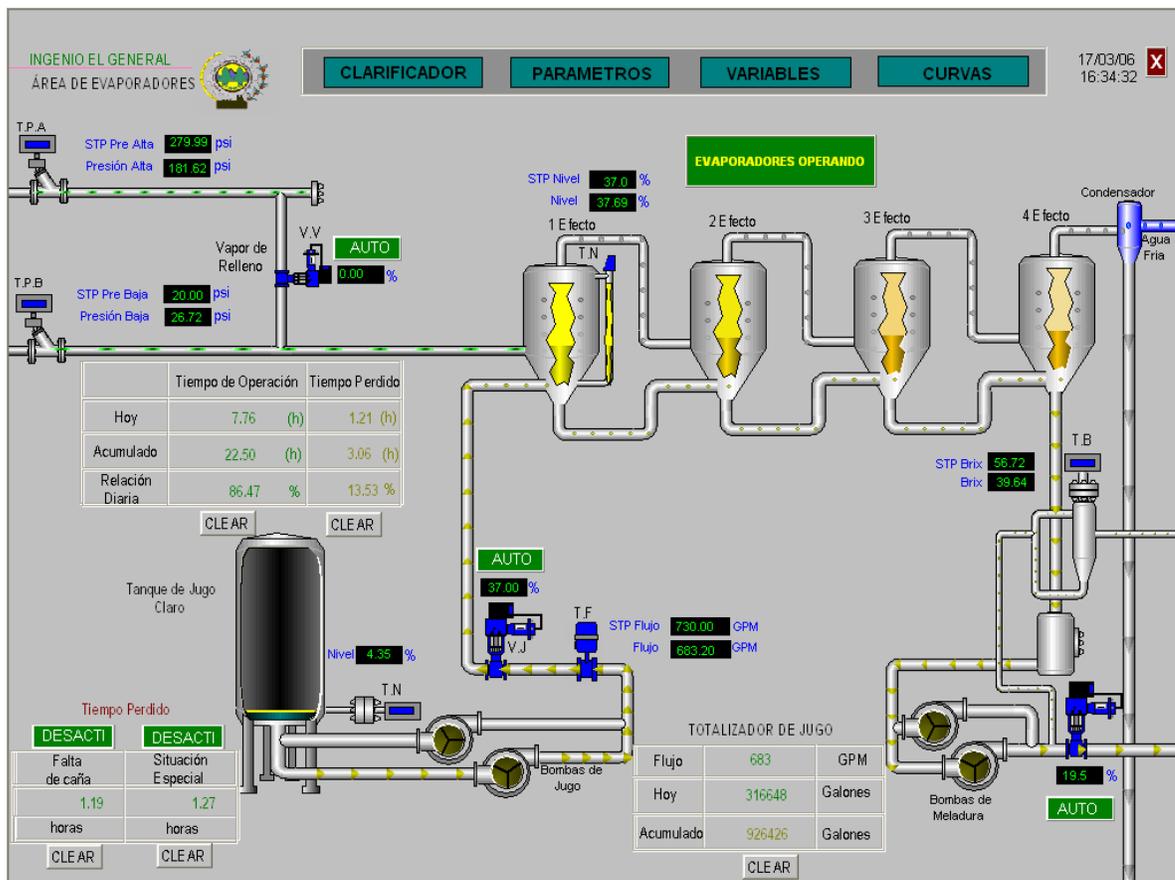


Figura 5.8 Pantalla principal para el control de evaporadores.

Para el lazo de control de temperatura de meladura y la visualización del pH se diseña una pantalla grafica independiente (figura 5.9), desde donde se puede observar el comportamiento del sistema y acceder al control manual de la válvula de vapor.

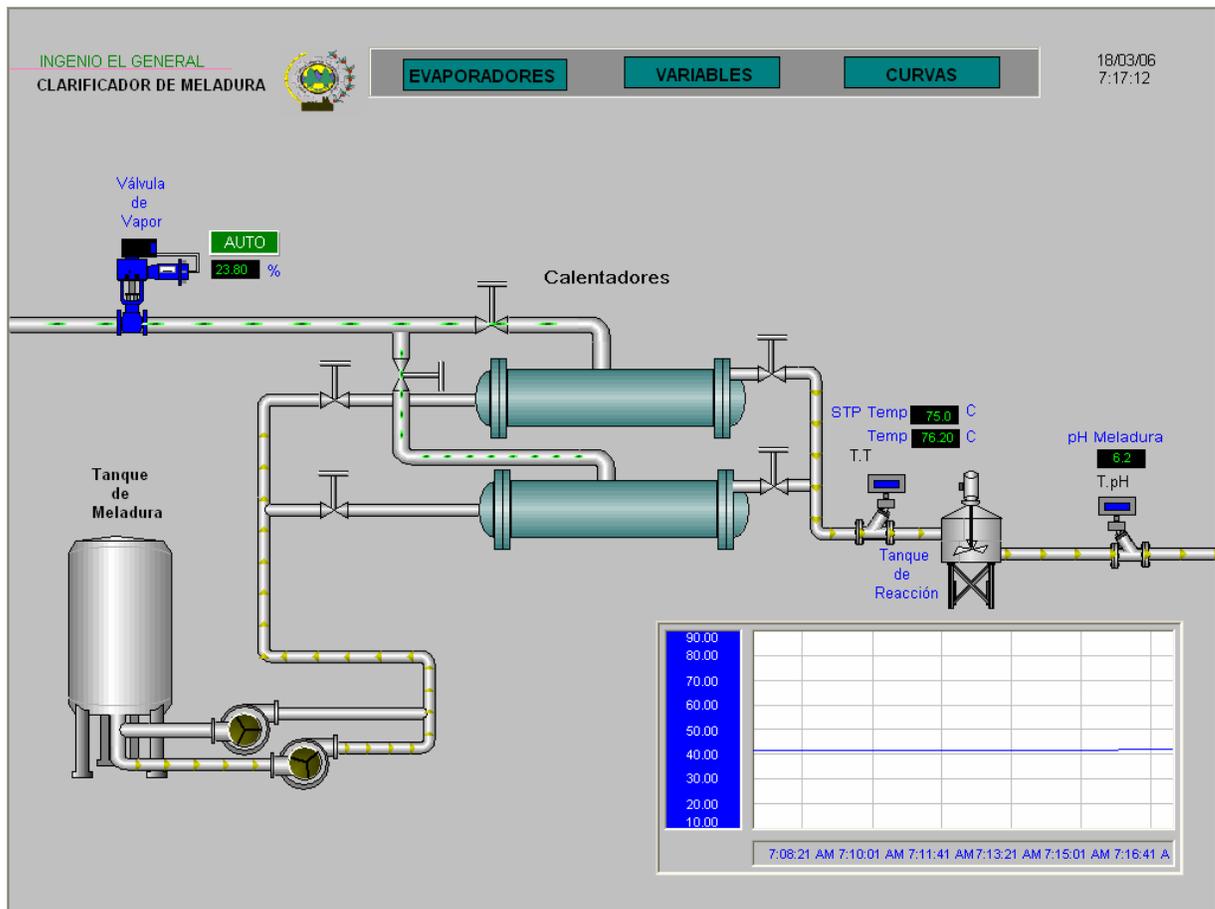


Figura 5.9 Pantalla para control de la temperatura de meladura.

Para introducir o cambiar los Set Point de las variables de control el operador debe digitar directamente los valores dando un simple clic sobre el recuadro negro adjunto al nombre de la variable, después se despliega un cuadro con los números del 0 al 9 y algunas funciones necesarias para introducir el valor deseado (ver figura 5.10). El nuevo dato debe encontrarse entre los márgenes previamente configurados.



Figura 5.10 Recuadro desplegado para modificar los Set Point.

Además se coloca una barra en la parte superior para realizar enlaces con otras pantallas (ver figura 5.11), entre los que se encuentra la interfaz de variables, utilizada para el control y la visualización de todas las variables y parámetros involucrados en la evaporación, también se puede cargar la pantalla de curvas, donde se grafican las principales señales proporcionadas por los transmisores y las relaciones de eficiencia. Por otra parte, para el ajuste del sistema se realiza un enlace a una pantalla de parámetros desde donde el encargado de instrumentación puede realizar las variaciones necesarias para lograr un funcionamiento adecuado. Para acceder a la pantalla para control de temperatura de meladura se agrega un nuevo enlace rotulado como clarificador.

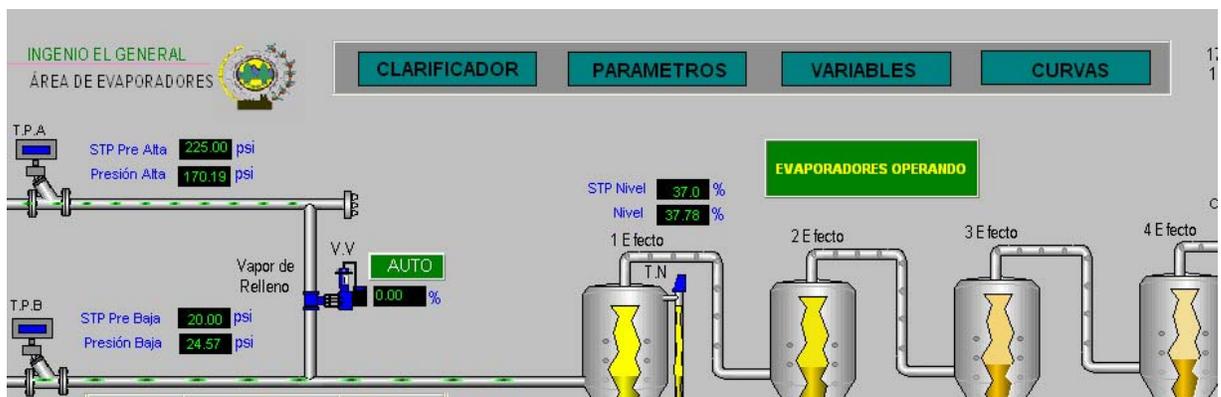


Figura 5.11 Ubicación y uso de los enlaces.

5.2.3 Despliegue de variables.

Con la intención de brindar al operador la posibilidad de visualizar y hasta manipular las variables involucradas en el proceso de evaporación se crearon dos pantallas exclusivas para variables y parámetros. Para lograr un mayor control y comprensión de los datos se organizan en grupos de señales, las generales se clasifican como entradas y salidas y las demás se agrupan dependiendo del lazo de control al que pertenezcan. En la figura 5.12 se muestra una de las tres interfaces creadas para este propósito.

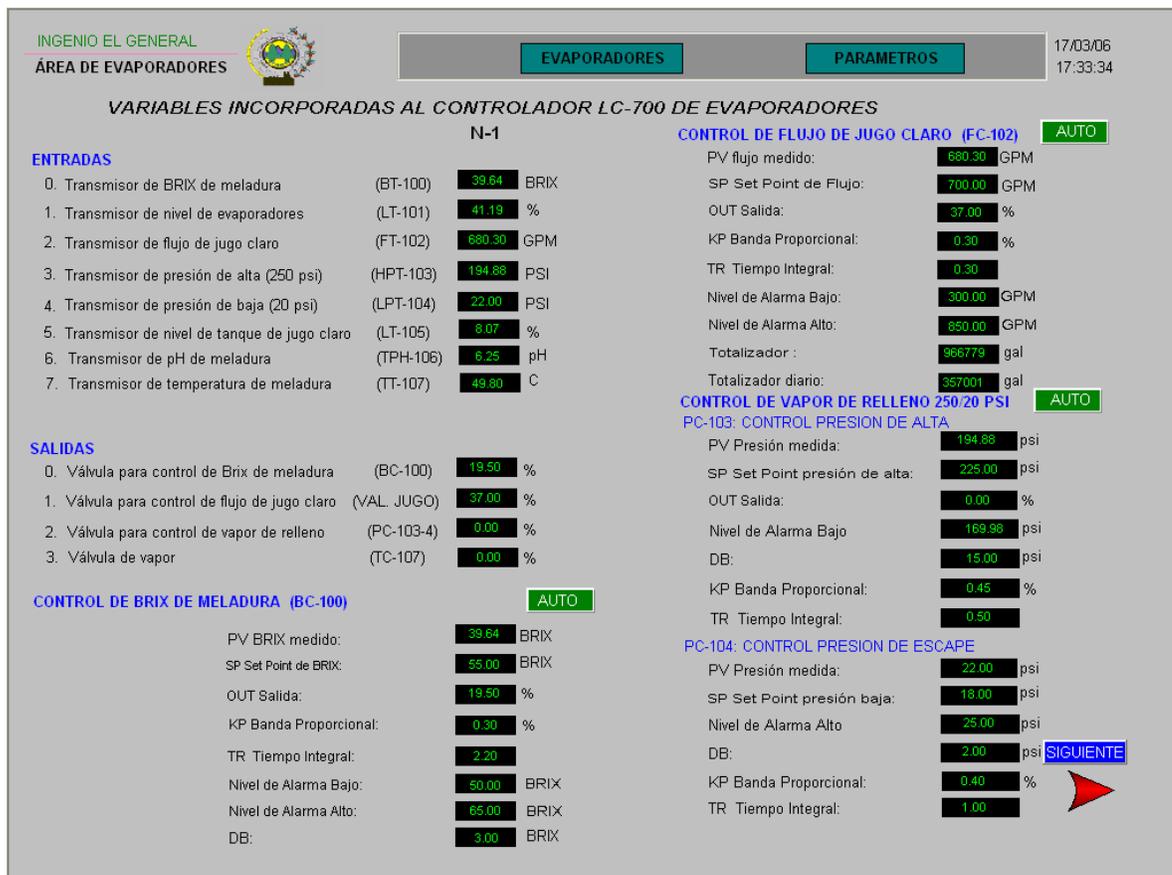


Figura 5.12 Variables de proceso.

5.2.4 Curvas de proceso.

Como ayuda al operador se ofrece la posibilidad de visualización en forma gráfica los datos recolectados por los transmisores instalados en el proceso, para esto crearon dos pantallas en las que se grafican cuatro señales sobre el mismo eje del tiempo, permitiéndole al operador comparar y obtener conclusiones sobre la tendencia de operación de evaporadores durante la última media hora de trabajo. También se incluyen gráficos de barras con información sobre los tiempos de operación del día y de la zafra (ver figura 5.13).

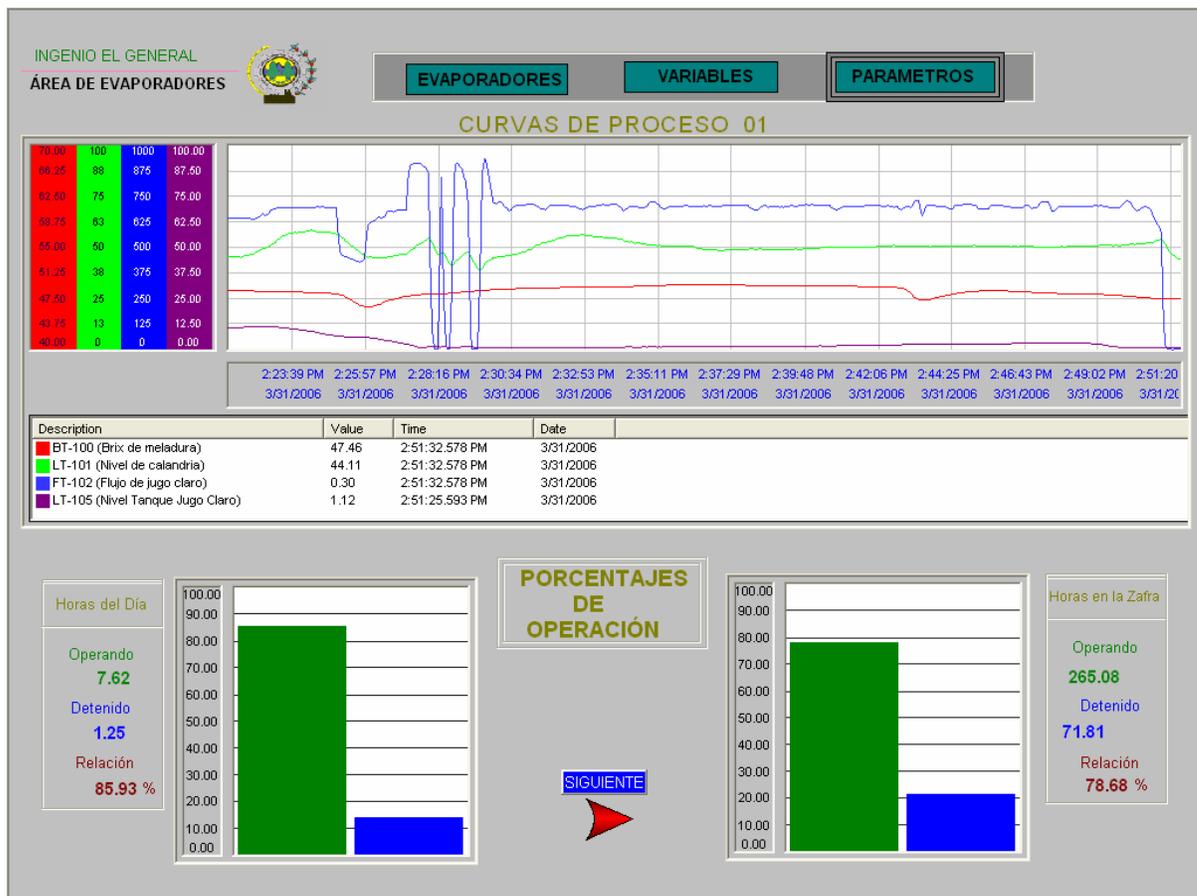


Figura 5.13 Curvas de proceso.

5.2.5 Parámetros de operación

Para facilitar el ajuste del sistema de control se diseñó una interfaz gráfica destinada exclusivamente al despliegue de los principales parámetros involucrados en el control, esta pantalla gráfica le brinda la posibilidad al encargado de instrumentación de modificar datos sin tener que reprogramar el PLC, simplemente debe digitar los valores que considere adecuados, el PLC los captura, modifica sus registros internos y continua la operación en base a los nuevos datos descargados. En la figura 5.14 se muestra la interfaz utilizada para esta aplicación.

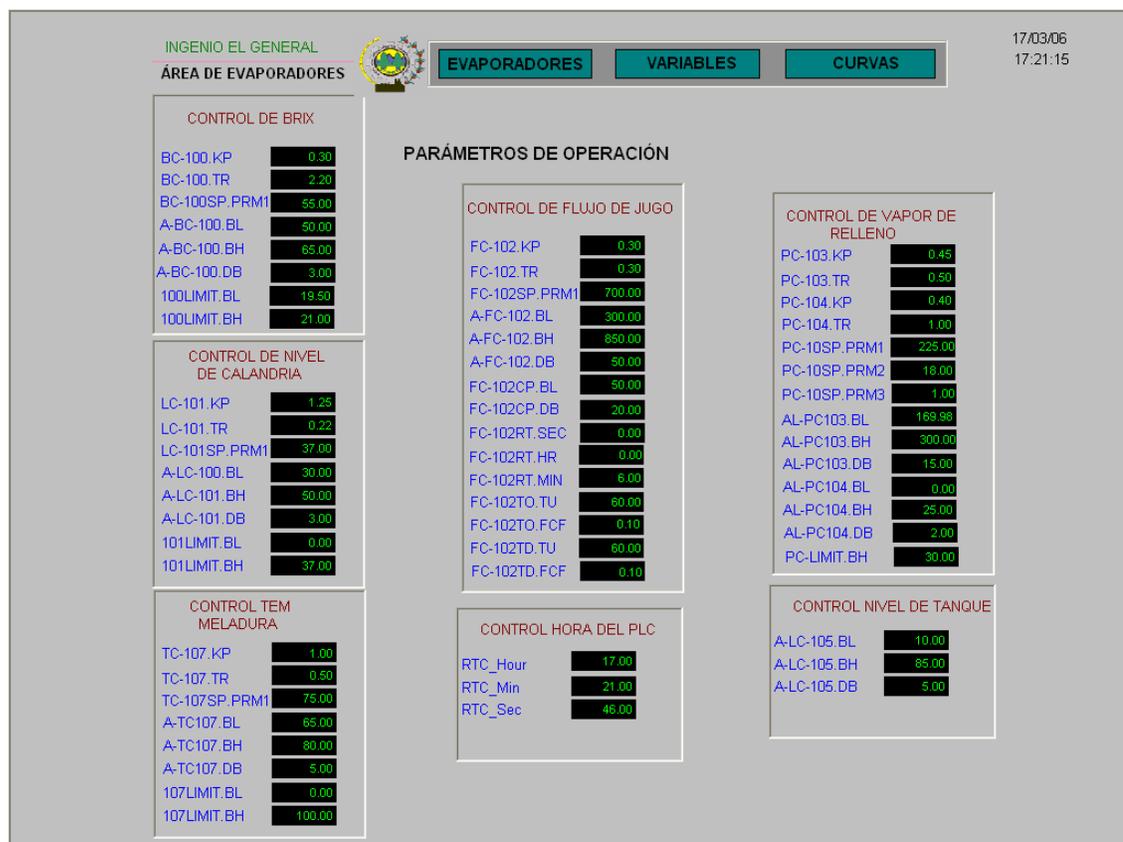


Figura 5.14 Interfaz para el ajuste de los parámetros del controlador.

5.2.6 Controles manuales.

Por lo delicado de la operación en evaporadores se consideró necesaria la programación de un control manual para cada una de las válvulas utilizadas, este control manual le permite al operador manipular las válvulas libremente sin tener que ajustarse a la respuesta que le pueda propiciar el lazo de control automático. Se propone como una opción ideal para arranques o ante la eventual falla de alguno de los transmisores. Cuando una válvula es controlada en forma manual el sistema escribe sobre el registro de salida asociado directamente a la válvula, por lo que no se respeta ningún parámetro o limitante, cediendo al operador el control total de la válvula. En la figura 5.15 se muestra uno de los cinco controles manuales.

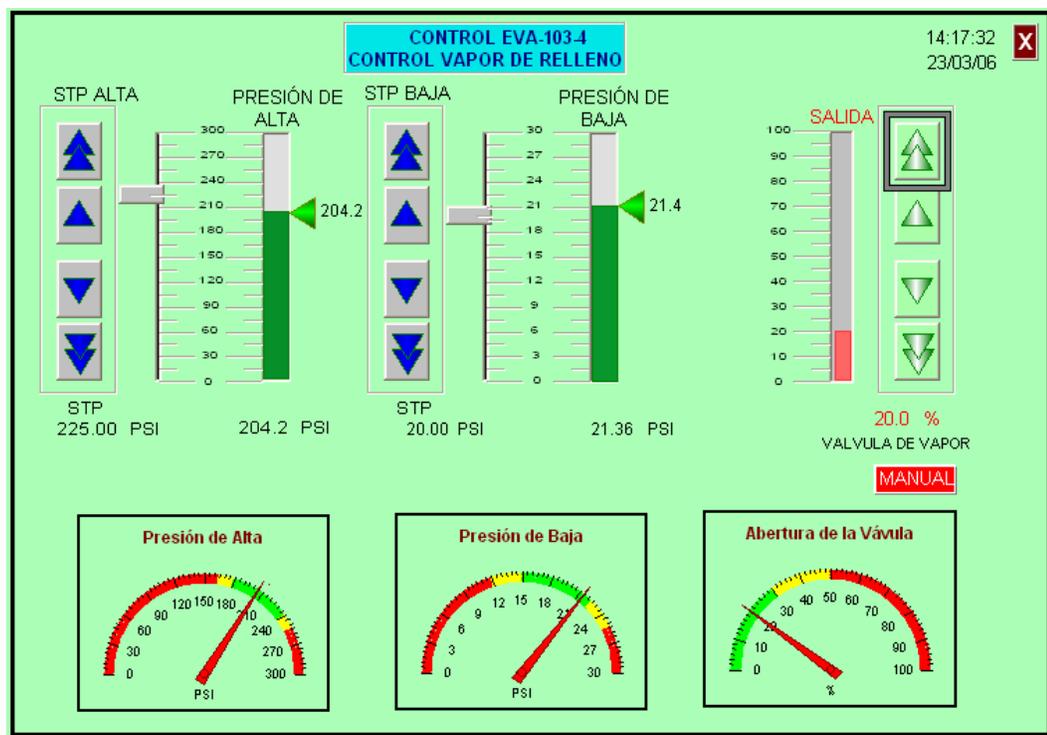


Figura 5.15 Controles manuales para válvulas.

5.3 Reporte de históricos.

Como una ampliación a los alcances del proyecto se programa la generación de dos reportes diarios, uno contiene los valores de las variables de proceso medidas (brix de la meladura, nivel de jugo en la calandria de los evaporadores, flujo de jugo claro que ingresa al tren de evaporación, nivel del tanque de jugo claro, presión de vapor de escape, presión de vapor de alta y ph de la meladura clarificada) y el otro realiza el cálculo del brix ponderado diario. Para la obtención de los datos se realiza la lectura de las variables cada cinco segundos, posteriormente los almacena en una base de datos y luego obtiene el valor máximo, mínimo y promedio en periodos de 30 minutos, estos valores son los que se agregan al reporte (Ver figura 5.16).

Para la generación de los reportes se configura en la PC una tarea programada que abre a las 06:10 am el archivo base llamado Reporte_Evaporadores.xls en el cual se programa una macro encargada de actualizar los datos y guardar una copia con el siguiente formato de nombre "Reporte_Evaporadores" & "_de_las_6am_del " & Day(Ayer) & "-" & Month(Ayer) & "-" & Year(Ayer) & " a_las_6am_del " & Day(Hoy) & "-" & Month(Hoy) & "-" & Year(Hoy) & ".xls", un ejemplo para el nombre de un archivo generado de esta forma seria *Reporte_Evaporadores_de_las_6am_del 3-11-2005 a_las_6am_del 4-11-2005.xls*

		INGENIO EL GENERAL											
		ÁREA DE EVAPORADORES											
Reporte de Variables del Proceso de Evaporación													
Fecha	Hora	BRIX DE MELADURA			FLUJO DE JUGO CLARO (GPM)			NIVEL DE EVAPORADORES (%)			NIVEL TAIQUE JUGO CLARO (%)		
		MINIMO	MAXIMO	PROMEDIO	MINIMO	MAXIMO	PROMEDIO	MINIMO	MAXIMO	PROMEDIO	MINIMO	MAXIMO	PROMEDIO
13/02/2006	6:00:00	56.68	56.69	56.69	0.20	764.00	764.00	32.68	56.74	56.74	1.31	1.44	1.44
13/02/2006	6:30:00	56.68	56.69	56.69	0.20	764.00	764.00	32.68	56.74	56.74	1.31	1.44	1.44
13/02/2006	7:00:00	0.00	56.85	56.17	0.00	1.50	466.72	0.00	110.84	72.41	0.00	20.60	8.65
13/02/2006	7:30:00	56.82	56.84	56.83	0.60	1.10	0.85	100.16	100.24	100.19	20.16	20.42	20.35
13/02/2006	8:00:00	56.81	56.83	56.82	0.50	723.50	3.91	98.75	100.16	99.63	19.82	20.46	20.22
13/02/2006	8:30:00	56.77	56.82	56.80	-0.60	1.60	1.02	99.43	100.16	99.93	18.02	19.70	18.81
13/02/2006	9:00:00	56.76	56.81	56.78	0.30	471.80	3.03	97.53	99.32	98.47	15.91	17.81	16.96
13/02/2006	9:30:00	56.74	56.79	56.76	0.10	844.50	79.38	16.09	97.26	60.71	13.41	26.44	18.49
13/02/2006	10:00:00	56.73	56.76	56.75	0.10	860.20	402.22	27.20	98.22	63.62	12.09	25.56	17.88
13/02/2006	10:30:00	39.65	57.17	56.03	487.60	716.80	597.24	49.12	65.69	59.16	39.00	52.03	41.95
13/02/2006	11:00:00	58.86	59.00	58.87	692.80	711.10	703.52	53.91	59.10	56.35	38.52	44.75	40.81
13/02/2006	11:30:00	58.98	59.02	59.00	0.10	715.80	430.89	28.48	65.08	48.80	10.52	46.85	25.37
13/02/2006	12:00:00	58.98	59.02	59.00	0.20	558.40	523.51	40.20	64.46	49.82	11.22	37.85	23.77
13/02/2006	12:30:00	58.99	59.03	59.01	0.10	554.20	422.26	31.26	62.98	47.11	2.62	20.17	9.45
13/02/2006	13:00:00	58.98	59.02	59.01	0.10	597.50	386.42	32.46	75.72	50.35	25.94	37.14	28.59
13/02/2006	13:30:00	58.99	59.03	59.00	0.00	762.00	519.15	23.36	71.54	54.42	21.66	44.02	36.18
13/02/2006	14:00:00	58.99	59.03	59.01	0.00	499.70	270.78	27.33	68.70	53.09	11.54	37.65	24.13
13/02/2006	14:30:00	58.99	59.03	59.01	0.00	1117.40	310.00	32.45	72.61	57.31	16.12	25.80	21.92
13/02/2006	15:00:00	58.98	59.01	59.00	0.10	671.10	447.64	32.88	73.51	54.90	19.55	33.37	26.32
13/02/2006	15:30:00	58.98	59.02	59.01	0.00	682.30	309.15	26.03	77.81	53.64	24.45	34.15	29.47
13/02/2006	16:00:00	59.01	59.02	59.01	0.00	693.40	576.37	26.71	71.90	53.77	3.05	47.21	28.62
13/02/2006	16:30:00	59.01	59.03	59.02	0.00	660.40	536.09	27.56	65.54	52.56	3.19	39.64	21.87
13/02/2006	17:00:00	59.00	59.03	59.02	0.00	813.60	558.41	30.51	66.77	57.99	22.11	46.74	34.14
13/02/2006	17:30:00	59.01	59.04	59.02	0.20	812.80	713.32	46.36	68.48	58.51	26.78	41.84	35.35
13/02/2006	18:00:00	59.02	59.03	59.03	643.70	666.70	663.50	48.04	62.79	53.29	31.67	50.65	38.73
13/02/2006	18:30:00	59.00	59.02	59.01	773.50	796.00	783.95	55.11	62.21	57.93	32.05	49.79	43.57
13/02/2006	19:00:00	58.99	59.03	59.01	756.20	788.80	779.20	56.32	58.77	57.57	25.68	31.02	28.21
13/02/2006	19:30:00	59.00	59.03	59.02	756.30	788.20	778.86	52.60	58.07	55.26	21.06	24.73	22.52
13/02/2006	20:00:00	59.01	59.02	59.01	760.20	785.30	774.89	54.24	65.54	59.06	17.60	21.89	20.24
13/02/2006	20:30:00	59.01	59.04	59.03	0.30	785.70	739.00	48.59	80.11	63.92	16.17	22.62	17.97
13/02/2006	21:00:00	59.03	59.04	59.04	0.10	794.90	515.40	16.86	99.93	59.52	11.60	21.60	14.11
13/02/2006	21:30:00	59.02	59.05	59.04	0.00	793.20	48.33	38.63	80.91	50.21	12.29	12.81	12.50
13/02/2006	22:00:00	59.03	59.06	59.04	0.30	810.10	61.06	33.24	79.74	56.97	12.26	18.86	14.07
13/02/2006	22:30:00	59.02	59.06	59.04	0.10	804.80	45.43	39.06	68.86	50.96	13.42	14.19	13.66
13/02/2006	23:00:00	59.03	59.06	59.05	0.20	795.20	30.81	38.77	71.77	50.10	14.03	15.60	14.87
13/02/2006	23:30:00	59.03	59.07	59.05	0.10	815.60	65.55	30.08	72.96	43.86	14.35	15.20	15.04
14/02/2006	0:00:00	59.06	59.07	59.06	0.10	797.70	100.93	24.92	89.28	47.72	14.44	35.18	19.56

Figura 5.16 Información contenida en el reporte de variables de proceso.

En el segundo reporte se realiza el cálculo del Brix ponderado, para la obtención de este dato se requiere las lecturas de flujo de jugo claro y Brix de meladura. Al igual que en el reporte anterior los datos son capturados cada cinco segundos y almacenados en una base de datos, no obstante, en este caso se calcula el promedio de ambas señales en periodos de un minuto. De esta manera se logra adjuntar cada minuto un valor actualizado al reporte, lográndose un total de 1440 datos diarios. Como se obtienen datos de flujo en galones por minuto y se logran lecturas cada minuto, con la ayuda del programa Microsoft Excel se puede configurar un totalizador y lograr el cálculo de los datos mencionados en la tabla 5.1. Adicionalmente se agrega al reporte las lecturas de temperatura de meladura.

Tabla 5.1 Datos requeridos y forma de cálculo del Brix Ponderado.

	Lectura de Brix	Lectura de Flujo	Galones Acumulados	Brix Ponderado
1	B_1	F_1	F_1	$\frac{B_1 * F_1}{F_1}$
2	B_2	F_2	$\sum_{1-2} F_n$	$\frac{B_2 F_2}{\sum_{1-2} F_n}$
3	B_3	F_3	$\sum_{1-3} F_n$	$\frac{B_3 F_3}{\sum_{1-3} F_n}$
...
n	B_n	F_n	$\sum_{1-n} F_n$	$\frac{B_n F_n}{\sum_{1-n} F_n}$

Es así como al final de las veinticuatro horas se logra obtener el dato número 1440 correspondiente al Brix ponderado del día. Para este reporte se crea un archivo en Excel en el que se importan los datos desde un archivo de texto de tipo .CSV, específicamente desde el archivo Brix_Ponderado.csv, actualizado en forma automática todos los días a las 6:00 am. Al archivo base se le programa una macro encargada de actualizar los datos, guardar una copia del archivo y cerrarlo después de finalizada la operación de guardar. La copia del archivo se guarda bajo el mismo formato del reporte descrito anteriormente, un ejemplo para el nombre del archivo generado sería *Reporte_Brix_de_las_6am_del 3-11-2005 a_las_6am_del 4-11-2005.xls*.

5.4 Software de enlace entre el PLC y la PC.

Para lograr el control y monitoreo de las variables de proceso desde una computadora se requiere la utilización de una estructura jerárquica de programas, estos software se encargan de acondicionar, interpretar, procesar y desplegar los datos transmitidos por los equipos instalados a lo largo del proceso. La estructura general se muestra en la figura 5.17. En este diagrama se muestran varios OPC cliente, estos OPC cliente corresponden a programas diseñados para ser instalados en la PC y servir de puente de comunicación hacia el OPC servidor asociado. En el OPC cliente se diseñan las diferentes pantallas de visualización y control, colocando al alcance del operador datos importantes de proceso y permitiéndole la manipulación de muchos otros. Como software para el OPC cliente se escogió Génesis 32, ya que en el ingenio se disponía de una licencia y fue aprovechada en esta área.

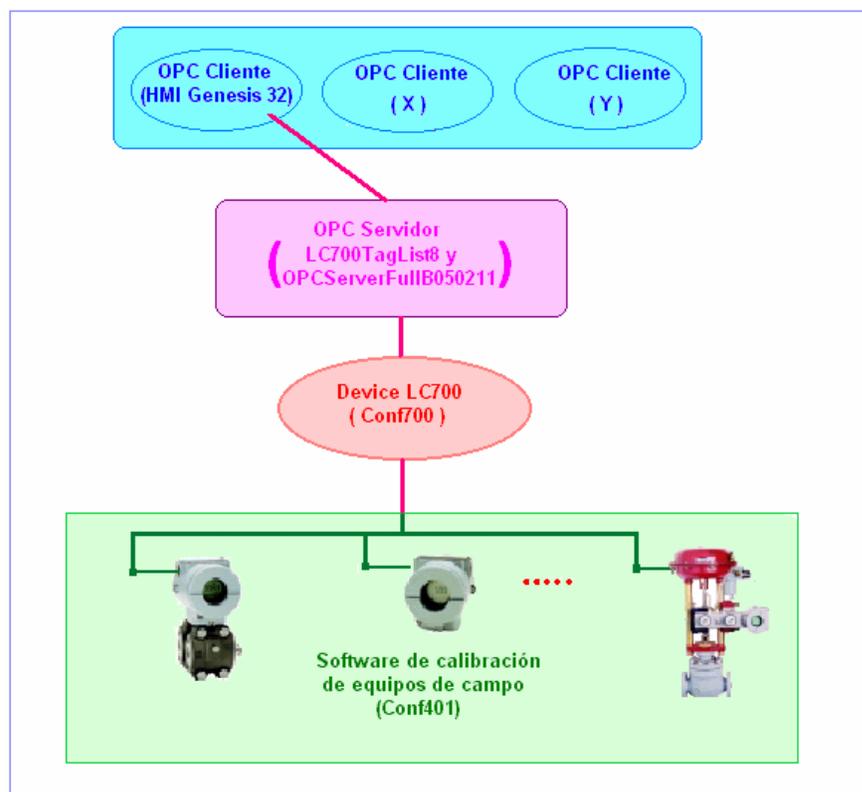


Figura 5.17 Diagrama de la jerarquía del software utilizado [Ref. 6]

El OPC servidor tiene a su cargo la administración de las direcciones de memoria y la conversión de las señales que así lo requieran, como el PLC transmite las señales en el rango de 0 a 10000, en muchas señales es recomendable realizar una conversión, por ejemplo, en el caso de señales de nivel, es conveniente pasarlas a un rango de 0 y 100 de tal forma que represente un valor porcentual. El OPC servidor utilizado es el LC700TagList8 junto al OPCServerFullB050211, con este software se crea la lista de direcciones a partir del archivo de configuración del PLC. El TagList o lista de direcciones es una lista que contiene todos los tag o variables utilizadas en la programación del PLC, cada una de estas variables puede ser acondicionada para ser interpretada más fácilmente en la interfaz humano máquina programada en el OPC cliente, en la figura 5.18 se muestra una sección del TagList creado.

Port Name	Device Tag	Tag	Address	Conversion	Type	Description
Evaporadores	Evaporadores04	FC-102.LA	02019	<None>	BOOL	Alarma de bajo flujo de jugo claro
Evaporadores	Evaporadores04	TC-TPER.CLEA	02020	<None>	BOOL	Reset de tiempo total perdido
Evaporadores	Evaporadores04	TC-TOPE.CLE	02021	<None>	BOOL	Reset de tiempo total operando
Evaporadores	Evaporadores04	FC-102.CLEAR	02022	<None>	BOOL	Reset de tatalizador de jugo de s
Evaporadores	Evaporadores04	FC-102.RD	02023	<None>	BOOL	Alarma diaria a las 6 am
Evaporadores	Evaporadores04	TC-DIARIO	02024	<None>	BOOL	
Evaporadores	Evaporadores04	T-PERFC.INI	02025	<None>	BOOL	Activa totalizador de tiempo perdi
Evaporadores	Evaporadores04	T-PERME.INI	02026	<None>	BOOL	Activa totalizador de tiempo perdi
Evaporadores	Evaporadores04	T-PERME.CLEA	02027	<None>	BOOL	Reset del totalizador de tiempo pe
Evaporadores	Evaporadores04	T-PERFC.CLEA	02028	<None>	BOOL	Reset de totalizador de tiempo pe
Evaporadores	Evaporadores04	PHC-106.LA	02029	<None>	BOOL	Alarma de ph bajo
Evaporadores	Evaporadores04	PHC-106.HA	02030	<None>	BOOL	Alarma de ph alto
Evaporadores	Evaporadores04	CUENTA	02031	<None>	BOOL	Se actica despues de sobrepasar
Evaporadores	Evaporadores04	VM1BG1T114.7	02032	<None>	BOOL	
Evaporadores	Evaporadores04	TC-107.MA	02033	<None>	BOOL	Manual automático de la válvula
Evaporadores	Evaporadores04	TC-107.HA	02034	<None>	BOOL	Alarma por alta temperatura
Evaporadores	Evaporadores04	TC-107.LA	02035	<None>	BOOL	Alarma por baja temperatura
Evaporadores	Evaporadores04	VM1BG1T115.3	02036	<None>	BOOL	
Evaporadores	Evaporadores04	VM1BG1T115.4	02037	<None>	BOOL	
Evaporadores	Evaporadores04	VM1BG1T115.5	02038	<None>	BOOL	
Evaporadores	Evaporadores04	VM1BG1T115.6	02039	<None>	BOOL	
Evaporadores	Evaporadores04	VM1BG1T115.7	02040	<None>	BOOL	
Evaporadores	Evaporadores04	BT-100	30001	40-70	INT	Transmisor de brix de meladura
Evaporadores	Evaporadores04	LT-101	30002	0-100	INT	Transmisor de nivel evaporadores
Evaporadores	Evaporadores04	FT-102	30003	0-1000	INT	Transmisor de flujo de jugo
Evaporadores	Evaporadores04	HPT-103	30004	0-300	INT	Transmisor de presión de 250 psi
Evaporadores	Evaporadores04	LPT-104	30005	0-30	INT	Transmisor de presión de 20 psi
Evaporadores	Evaporadores04	LT-105	30006	0-100	INT	Transmisor de nivel tanque jugo c
Evaporadores	Evaporadores04	PHT-106	30007	0-14	INT	Transmisor de ph me meladura ck
Evaporadores	Evaporadores04	TT-107	30008	20-95	INT	Transmisor de temperatura de ma
Evaporadores	Evaporadores04	BC-100	40001	0-100	INT	Válvula de meladura
Evaporadores	Evaporadores04	EC-102	40002	0-100	INT	Válvula de jugo claro
Evaporadores	Evaporadores04	PC-103-4	40003	0-100	INT	Válvula de vapor de relleno
Evaporadores	Evaporadores04	TC-107	40004	0-100	INT	Válvula de vapor para calentador
Evaporadores	Evaporadores04	BC-100.CTW	42501	<None>	WORD	
Evaporadores	Evaporadores04	BC-100.KP	42502	0-100	INT	
Evaporadores	Evaporadores04	BC-100.BIAS	42503	<None>	INT	
Evaporadores	Evaporadores04	BC-100.AwL	42504	<None>	INT	
Evaporadores	Evaporadores04	BC-100.AwU	42505	<None>	INT	

Figura 5.18 Lista de direcciones creada para ser utilizada por el servidor OPC.

Para la configuración del LC700 se utiliza el software Conf700, este programa se instala en una computadora, se crea el archivo de configuración y se descarga vía puerto serie al PLC. Una vez descargado el archivo y configurado el controlador, el Conf700 puede ser removido de la máquina, no siendo indispensable para la operación continua del equipo. En la calibración de los instrumentos de campo se utiliza el Conf401, este programa es diseñado para ser utilizado con equipos SMAR, sin embargo, puede ser empleado en cualquier equipo con capacidad para comunicación HART.

CAPITULO 6

6 ANÁLISIS Y RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 Análisis del diseño del sistema de control.

6.1.1 Análisis del hardware.

Antes de intentar definir los equipos requeridos se realizó un estudio completo de las características funcionales de los evaporadores, se evaluó el ambiente industrial bajo el que operan recolectando información relacionada con las condiciones térmicas y químicas imperantes, la humedad y la posible ubicación de los equipos a lo largo de la línea de producción. Además se determinaron las longitudes aproximadas de las líneas de comunicación así como las posibles fuentes de ruido eléctrico presentes a lo largo de las trayectorias a seguir, lo cual contribuyó en la escogencia de la comunicación de 4-20 mA como la mejor opción, ya que cubre largas distancias y se comporta prácticamente inmune ante el ruido eléctrico, situaciones que se planteaban como limitantes a la hora de escoger la forma en la que los transmisores debían comunicar la información al PLC.

Ya con las condiciones de operación claras y los alcances del proyecto definidos se realizó la búsqueda en Internet de los posibles equipos a utilizar, tomando en cuenta el tipo de comunicación, el presupuesto asignado al proyecto y los posibles proveedores. Luego de analizada la información recopilada se procedió a definir la estrategia de control y a tramitar las respectivas ordenes de compra.

Para lograr los requerimientos de la empresa se implementó un sistema de comunicación y adquisición de datos (SCADA) capaz de medir, monitorear, guardar y controlar varias de las variables involucradas en el proceso de evaporación y clarificación de meladura.

A nivel general se utilizó una computadora, un PLC, un grupo de transmisores y un grupo de actuadores. El PLC recibe información de los transmisores y la computadora, la analiza y envía la respuesta a la computadora y a los actuadores.

El PLC es el encargado de interpretar y analizar gran parte de la información, siendo el dispositivo que contiene programada la estrategia de control. Se encuentra constituido por cuatro módulos, el que contiene la fuente de poder, el del CPU, el de entradas analógicas y el de salidas analógicas; los módulos de entrada y salida se escogieron después de seleccionar el tipo de comunicación requerido.

El módulo de entrada recibe señales analógicas de corriente provenientes de los transmisores, las digitaliza y las transmite a la unidad central de proceso para su interpretación, si el controlador requiere realizar alguna modificación a las condiciones del proceso, lo hace a través del módulo de salida quien convierte las señales digitales en analógicas de 4-20mA y las transmite a los actuadores (válvulas electro-neumáticas).

Con la intención de aprovechar la capacidad de almacenamiento de la PC, se configura una base de datos encargada de almacenar la información recolectada por los transmisores, la base de datos se actualiza durante el día y es leída diariamente a las 6:00 am por un programa encargado de generar varios archivos del tipo .csv. Los datos de los archivos .csv son importados por archivos de Excel que contienen macros, estas macros se encargan de actualizar los datos, guardar una copia del archivo con un nombre específico y en un directorio predeterminado y cerrar el programa. Para abrir los archivos de Excel se utilizan tareas programadas de Windows haciendo de la generación de reportes una actividad completamente automática.

Otra de las aplicaciones dadas a la computadora es la de servir de unidad para monitoreo y control de proceso (interfaz humano máquina), se le programan pantallas gráficas para el despliegue de información ayudándole al operador a lograr una interpretación rápida y correcta de las condiciones de operación, por otra parte, permite la introducción de datos sirviendo de canal de comunicación entre el operador y el PLC.

Para determinar el Brix de la meladura se requería un equipo capaz de transmitir una señal analógica de 4-20mA, soportar la temperatura de la meladura (cerca de los 60°C), ser instalado directamente en la línea reproducción y además transmitir en forma continua, todos estos requerimientos contribuyeron para escoger el transmisor DT301 de SMAR como la mejor opción.

El DT301 se calibró entre los 40 y 70 °Brix y se colocó al final de la etapa de evaporación en una estructura especialmente diseñada para tomar una muestra de la meladura de salida, analizarla y luego drenarla al tanque, de esta forma se logró transmitir el Brix en forma continua.

Las condiciones de proceso en los evaporadores son sumamente extremas, y se debía medir el nivel de jugo en las calandrias, por lo tanto se escogió un equipo capaz de trabajar en ambientes corrosivos y a altas temperaturas de proceso. El BM-102 es un transmisor de alta resolución y con comunicación de 4-20 mA diseñado para trabajar en varios rangos de temperatura, dependiendo del tipo de punta de prueba que se utilice. Para esta aplicación se instaló un transmisor con punta de prueba tipo cable simple de acero reforzado de 8 mm de diámetro, esto le permite permanecer en contacto con el HCL utilizado en la limpieza y soportar la alta temperatura del jugo (superior a los 100°C). Como principal restricción se tiene los 60°C máximos de temperatura ambiente, por esta razón se forraron con fibra y una cubierta metálica todas las fuentes de calor cercanas al lugar donde se ubica el transmisor.

Otra de las variables a medir era el flujo de jugo cloro de entrada a los evaporadores, este jugo se encuentra a una temperatura cercana a los 100 °C y es bombeado desde el tanque a través de una tubería de 6". Tomando en cuenta la capacidad de las bombas se colocó un transmisor de flujo tipo electromagnético Optiflux 1000 de 4", como el diámetro del transmisor es menor que el de la tubería fue necesario realizar una reducción, para el diseño de la reducción se tomaron en cuenta los criterios de estabilidad del flujo brindados por el fabricante del equipo; no debía existir ninguna deformación o cambio brusco de dirección 40 pulgadas antes y 8 pulgadas después del transmisor. El Optiflux 1000 es diseñado para operar a temperaturas de proceso de hasta 150°C y se calibró de 0 a 1000 GPM.

Para lograr la visualización del nivel del tanque de jugo claro se requería un transmisor capaz de trabajar a una temperatura de proceso de 100°C, considerando que el tanque se encuentra abierto a la atmósfera se utilizó un transmisor de presión LD301L con flange de conexión de 2", este transmisor es de alta resolución y se coloca en la parte inferior del tanque (nivel 0%)

En la medición de la presión de vapor de alta y de escape se utilizaron dos transmisores LD291 de la marca SMAR, estos equipos requieren de un montaje especial cuando se utilizan en tuberías de vapor. La conexión se realiza por medio de tuberías de 0.5" de tal forma que permitan la formación de una columna de condensado (en este caso agua), de esta forma se logra una mayor estabilidad en la medición ya que la presión se ejerce sobre el condensado y este sobre el sensor del transmisor, evitando la distorsión introducida por la velocidad de movimiento del vapor. El transmisor de alta presión se calibró de 0 a 300 psi y el de vapor de escape de 0 a 30 psi.

Con la intención de aprovechar al máximo la capacidad de los módulos de entrada y salida adquiridos se agregó un lazo para control de temperatura de meladura y un transmisor de pH. Para medir y transmitir la temperatura se utilizó un transmisor del tipo TT421 conectado a un sensor de temperatura o RTD del tipo PT100, ambos equipos se encuentran diseñados para medir y transmitir en forma continua, permitiendo su instalación directa en el proceso. Para la regulación de la cantidad de vapor que se inyecta a los calentadores se utiliza una válvula mariposa de 12" de diámetro, a esta válvula se le conecta un actuador electro-neumático encargado de recibir la señal de control de 4-20mA y posicionar la válvula al grado de abertura indicado por la señal de corriente.

Para el monitoreo del pH de la meladura se utiliza un transmisor de pH del tipo 873APH conectado a un electrodo de vidrio, este electrodo funciona como sensor de pH, el montaje del electrodo se realiza en un sistema de rebalse desde donde se envían, a través de líneas de cobre, las señales de temperatura y pH hasta el analizador ubicado en el cuarto de control. El analizador interpreta los datos, realiza los ajustes y transmite una señal de 4-20 mA proporcional al pH medido.

Para lograr el control de las variables se requerían actuadores capaces de regular flujos, fue así como se escogieron dos válvulas de 6" con actuadores electro-neumáticos capaces de recibir una señal eléctrica de 4-20mA y con ayuda de una conexión neumática fijada en 40 psi posicionar la válvula en un grado de abertura proporcional al valor de corriente del lazo. De esta forma a corrientes iguales o inferiores a los 4 mA la válvula se cierra, por otra parte, si la corriente recibida por el actuador es de 12 mA la válvula se posiciona en un 50 %, si es de 20 mA el posicionador abre completamente la válvula, así para cada valor de corriente entre los 4 mA y 20 mA se logra un grado de abertura diferente. En el caso de la válvula de vapor de relleno ya se encontraba instalada en la planta y funciona bajo el mismo principio.

Por las largas distancias entre el puesto de control (PC y PLC) y los diferentes equipos de campo (transmisores y actuadores) se recurrió a un cableado especial, se utilizó cable BELDEN de tres hilos, dos de las líneas son de cobre y una es de acero. Las líneas de cobre poseen cubiertas aislantes y son protegidas del ruido eléctrico con una cubierta metalizada.

6.1.2 Análisis del software.

Para la programación del PLC se utilizó el software Conf700 v8.54 proveído por el fabricante del equipo, en este se definen los módulos utilizados y su ubicación a lo largo del Rack de montaje, se determina la ubicación de cada transmisor en el módulo de entradas y cada actuador en el módulo de salidas. La estrategia de control se divide en cinco secciones independientes, control de Brix, control de nivel de calandria, control de flujo de jugo, control de presión de relleno y control de temperatura de meladura.

Para el control de Brix se programa un regulador PI bajo el algoritmo “parallel” y en acción directa. Como el funcionamiento es en acción directa si la variable de proceso, en este caso el Brix, empieza a sobrepasar el valor fijado como Set Point, produce que el error aumente positivamente provocando un incremento en la salida, con este incremento se controla una válvula, se aumenta el flujo de salida y se disminuye el Brix.

La velocidad y la forma en la que el regulador realiza esta acción se determina mediante los parámetros K_P y T_R , aumentando la ganancia proporcional se le agrega mayor velocidad de reacción y por ende mayor sobreimpulso al sistema, por otra parte aumentando el tiempo integral se desmejora la velocidad haciendo al regulador más lerdo. Por tratarse de un proceso sumamente lerdo se determinó por medio de pruebas experimentales que para el control de Brix la ganancia proporcional debe ser de un 30% y el tiempo integral de 132 segundos.

En el lazo de control del nivel de calandria se programa otro regulador PI que funciona con el algoritmo de la ecuación 5.1, en este caso el tipo de acción es inversa. La acción inversa garantiza que ante un incremento de la variable de proceso (nivel de calandria) sobre el Set Point preestablecido se de un aumento del valor del error, con la diferencia que en este caso el error toma un valor negativo provocando una disminución de la salida, esta salida tiende a cerrar la válvula logrando una disminución del nivel. Al igual que en el caso anterior se logro establecer por medio de pruebas experimentales una ganancia proporcional del 125% con un tiempo integral de 13.2 segundos como parámetros para un adecuado funcionamiento del lazo.

Otra de las variables que requería un control automático era el flujo de jugo que se inyecta al tren de evaporación, en este caso se utilizó un regulador PI, que, al igual que los demás trabaja con el algoritmo de la ecuación 5.1. El tipo de acción del regulador es inversa de tal forma que produce una disminución de la salida como consecuencia de un aumento en el flujo, con la salida se controla una válvula encargada de reducir el flujo a través de la tubería. Como la válvula actúa directamente sobre el flujo se requirió de mucho cuidado a la hora de fijar los parámetros del regulador ya que por ninguna circunstancia se debía cerrar completamente la válvula sin antes haber apagado la bomba, por otra parte, si la válvula permanecía completamente abierta por algunos pocos segundos se da un flujo excesivo que podía llenar los pre-evaporadores causando serios problemas al funcionamiento normal del proceso. Considerando todos los riesgos y las situaciones críticas que no se podían presentar se realizaron las pruebas necesarias para determinar los parámetros requeridos para un adecuado funcionamiento, de esta forma se definió una ganancia proporcional de 30% y un tiempo integral de 18 segundos.

El vapor de escape es la principal fuente de energía utilizada en los evaporadores, por lo tanto, variaciones en su presión producen alteraciones en el funcionamiento de los evaporadores. Con la intención de atenuar los cambios de presión del vapor de escape se programaron dos lazos de control encargados del posicionamiento de la válvula colocada entre la tubería de vapor de calderas (presiones cercanas a las 250psi) y la tubería de vapor de escape (presiones alrededor de las 15 psi). Con un sistema de alarma de baja presión se selecciona entre dos reguladores PI con salidas determinadas por la ecuación 5.1, uno trabaja con la señal de presión de alta y otro con la señal de presión de escape.

Por razones operativas de la planta no se permite rellenar cuando la presión de calderas se encuentra baja, por lo tanto cuando se activa la alarma de baja presión se selecciona el regulador conectado al transmisor de alta presión, por ser programado para funcionar en acción directa un decremento de la variable de proceso por debajo del Set Point implica una disminución de la salida, tendiendo a cerrar la válvula. La forma en la que se cierra esta válvula es determinada por los valores de la ganancia proporcional y el tiempo integral, tomando todas las previsiones necesarias se realizaron algunas pruebas y se logró obtener una ganancia del 45% con un tiempo integral de 33 segundos como parámetros para un buen funcionamiento del lazo.

Por otra parte, si se tiene buena presión en calderas el programa selecciona el regulador de acción inversa conectado al transmisor de presión de vapor de escape. En este caso si la presión de escape baja del Set Point establecido el regulador aumenta su salida y tiende a abrir la válvula, al abrirse la válvula se inyecta vapor de la línea de alta a la línea de vapor de escape. Al igual que en el caso anterior se requirió de mucho cuidado a la hora de realizar las pruebas, como principal medida se restringió la abertura máxima de la válvula, esto permitió evaluar el comportamiento del lazo sin poner en riesgo la seguridad del personal de la planta o la continuidad del proceso.

Por medio de pruebas se logró determinar que para una respuesta gradual y segura del lazo de control de baja presión se requiere de una ganancia proporcional del 45% y un tiempo integral de 60 segundos.

Para el control de temperatura de meladura se programa un lazo de control independiente, donde únicamente interviene como señal de control la temperatura. Al igual que en los lazos anteriores se conecta un regulador PI al lazo y se procede a realizar las pruebas. El regulador se programa en acción inversa con una ganancia proporcional del 100% y un tiempo integral de 30 segundos.

Como una expansión a los alcances del proyecto se agregó el monitoreo del nivel del tanque de jugo claro, la presión de vapor de alta o de calderas y la presión del vapor de escape. Para lograr monitorear estas y muchas otras variables se diseñaron varias interfaces gráficas con el programa GraphWorX32, se programan controles sumamente simples de interpretar y operar ya que se representan la mayoría de los datos tanto en forma decimal como en forma gráfica

Además del monitoreo se contempla la totalización de algunos datos, entre estos se encuentra la cantidad de galones de jugo que ingresan diariamente a los evaporadores y el acumulado durante la zafra, el total de horas diarias de operación, total de horas perdidas durante el día, las horas operadas y perdidas de la zafra; todos los registros diarios se borran automáticamente a las 6:00am. Para conocer las horas perdidas por razones ajenas al funcionamiento de los evaporadores se crearon dos totalizadores, uno se encarga del registro de las horas perdidas por falta de caña y otro de las debidas a alguna situación especial.

Con la ayuda del software TrendWorX32 se configuró la generación diaria de cuatro archivos de tipo .csv (valores separados por coma). Para poder generar estos archivos se creó una base de datos en Access encargada de respaldar toda la información recolectada por los transmisores durante el día. Una vez actualizados los datos de los archivos .csv se ejecutan automáticamente a las 6:10 am dos tareas programadas encargadas de abrir cada una un archivo de excel; cada archivo contiene programada una macro que actualiza los datos, respalda la información en un formato agradable, deshabilita la actualización automática y cierra el programa.

6.2 Alcances y limitaciones.

Con el sistema de control automático implementado se logró estabilizar el flujo de jugo claro que ingresa al tren de evaporación, se minimizaron las fluctuaciones del nivel de jugo presente en las calandrias de los pre-evaporadores y se controló la densidad de la meladura de salida. De esta forma se lograron mantener los principales parámetros en rangos de operación adecuados, obteniendo una mayor eficiencia de evaporación.

Por medio de la realización de cada una de las actividades planteadas en la metodología se cumplió con la meta del proyecto y se cubrieron los objetivos planteados inicialmente.

Después de el inicio del proyecto se detectaron otras necesidades, algunas de las cuales fueron solucionadas por medio de la expansión de los alcances del proyecto, se agregaron varios equipos entre los que se encuentra una PC, una UPS de 1.5KVA, un transmisor de nivel para el tanque de jugo claro y un transmisor de pH, aumentando considerablemente la inversión por parte de la empresa. Además se incorporó al proyecto el control de vapor de relleno y temperatura de meladura cuya instrumentación ya había sido adquirida con anterioridad.

Como principal limitación del proyecto se tiene la diferencia en el diseño y la altura de las calandrias de los evaporadores y la inestabilidad de la presión de escape, lo cual provocó que el control de nivel se limitara a los primeros tres cuerpos.

CAPITULO 7

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Controlar el Brix de la meladura de salida de evaporadores optimiza el sistema y mejora las condiciones de operación de la siguiente etapa (tachos).
- El sistema logró controlar el flujo de jugo claro de entrada, estabilizando y mejorando las condiciones de operación de los evaporadores.
- Se controló el nivel de jugo en las calandrias de los pre-evaporadores, logrando un mejor aprovechamiento del área de transferencia de calor.
- Los reportes generados representan una buena documentación del proceso de evaporación y pueden ser consultados en el momento que el personal lo considere conveniente.
- Mantener la presión de escape entre un rango de operación apropiado estabiliza la generación de vapor vegetal y mejora considerablemente la operación de los evaporadores.
- Adicionalmente se logró controlar en forma automática la temperatura de meladura que ingresa al clarificador.

7.2 Recomendaciones generales.

- Antes de operar el sistema es **indispensable** leer, estudiar y entender el manual de operación y datos técnicos anexo a este informe.
- En caso de presentarse una falla eléctrica en la entrada del posicionador de las válvulas, estas se **cerrarán**, por lo tanto debe trabajarse en forma completamente manual haciendo uso de las válvulas mecánicas colocadas en paralelo con las automáticas.
- Si falla la conexión neumática de los actuadores de las válvulas mariposa de meladura y jugo, estas se quedarán en la última posición lograda con presión de aire.
- Antes de realizar alguna modificación al sistema es indispensable leer el informe del proyecto y ante la duda consultar a una persona capacitada.
- Es conveniente que se documente cualquier cambio realizado y se adjunte a la documentación existente del proyecto.
- Respalde los archivos de configuración del PLC, interfaces gráficas, generación de reportes y lista de direcciones antes de realizar cualquier modificación.
- En la realización de este proyecto no se emplea toda la capacidad del PLC, por lo que su utilización en proyectos futuros es completamente viable.
- Se recomienda la instalación de tres válvulas manuales, una antes, otra después y otra en paralelo con la válvula de vapor de relleno, ya que cualquier válvula automática instalada debe poder ser retirada para mantenimiento sin interrumpir la continuidad del proceso.

- El transmisor de presión de vapor de alta debe ser reubicado, preferiblemente en el tramo de tubería donde se unen todas las calderas, de esta forma se logrará una lectura más correcta de la señal requerida, ya que en la ubicación actual presenta una lectura con un error de aproximadamente 25 psi.

7.3 Recomendaciones en materia de seguridad industrial.

- El uso de los cascos de seguridad por parte de los empleados y los visitantes debe ser una norma de acatamiento estrictamente obligatorio.
- Deben rotularse mejor las salidas de emergencia.
- En el área de evaporadores existe la rotulación de una ducha de emergencia y el espacio esta siendo utilizado para otro fin. Este lugar debe acondicionarse como ducha de emergencia de tal forma que se garantice el acceso libre.
- Se debe mejorar el diseño de los silenciadores de las tuberías de alivio, ya que los actuales son muy ruidosos.
- Mejorar el diseño de las gradas de acceso ya que muchas no cumplen con la norma vigente para este tipo de estructuras.
- Deben colocarse válvulas de alivio automáticas en la tubería de vapor de escape.
- Es recomendable forrar con material aislante los evaporadores que no lo están.
- Es indispensable la elaboración y puesta en marcha de un plan de emergencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] División de Ingeniería de Grane. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: McGraw-Hill, 1992.
- [2] Hansen, Arthur. Mecánica de Fluidos. México: Limusa, 1974.
- [3] John, James E; Haberman, William L. Introducción a la mecánica de fluidos. España: Prentice-Hall, 1974.
- [4] National Fire Protection Association (FFPA), Código Eléctrico Nacional, USA, 1999.
- [5] Creus, Antonio. Instrumentación Industrial. 6 ed. México. Alfaomega, 1999.
- [6] SMAR International Corporation. LC-700 Users Guide: Maintenance and Operation Manual.
- [7] SMAR International Corporation. Operation and Maintenance Instruction Manual: Inteligent Concentration/Density Transmitter DT301.
- [8] SMAR International Corporation. Manual de Instrucciones Operación y Mantenimiento: Transmisor Inteligente de Presión LD291.
- [9] SMAR International Corporation. HART Intelilent Temperature Transmitter TT421: User Manual.
- [10] KROHNE Inc. BM-102 Microflex Handbook.
- [11] HART Communication Foundation, *HART Field Communication Protocol* [en línea]. Austin. Texas, USA<<http://www.ife.tugraz.at/datashts/HART/hartcomm.pdf>> [Consulta: 13 marzo 2006]

[12] Helson, Ronald. *The HART Protocol - A Solution Enabling Technology* [en línea]. Austin, Texas, USA < <http://www.ife.tugraz.at/datashts/HART/harttech.pdf>> [Consulta: 13 marzo 2006]

[13] Incauca S.A. *Nuestra Actividad Productiva* [en línea]. <<http://www.incauca.com/Incauca/proceso.html>> [Consulta: 13 marzo 2006]

[14] Coopeagri R.L. *Estructura Política* [en línea]. Pérez Zeledón, Costa Rica. <http://www.coopeagri.co.cr/coopeagri/aspectos/ca02_est_pol.htm> [Consulta: 27 junio 2005]

[15] Preafán, Felipe. *Cálculos simplificados de evaporadores* [en línea]. Colombia <<http://www.perafan.com/ea03evas.html>> [Consulta: 19 julio 2005]

APÉNDICES

A.1 Descripción de la empresa.

A.1.1 Historia.

CoopeAgri El General R.L nace el 25 de noviembre de 1962 como una alternativa de solución a los problemas que enfrentaban los pequeños y medianos caficultores de El General. De esta forma un grupo organizado de 391 productores realizaron la Asamblea Constitutiva de la denominada entonces CoopereZeledón, R.L con un capital social de ¢ 126 400.00.

Para iniciar su operación, la naciente cooperativa alquila el Beneficio San Jorge, con capacidad para procesar 12,000 fanegas de café por cosecha y después de varios años de operación, en 1965, lo compra. En 1969, ante la inestabilidad en el precio del café, y la necesidad de generar nuevas opciones para mejorar el nivel de vida de los productores se emprenden actividades en busca de la diversificación. Es así como el 09 de noviembre de 1969, se inaugura el "Supermercado Cooperativo", convirtiéndose en el primer Supermercado que se establecía en Pérez Zeledón y uno de los primeros en zona rural a nivel nacional.

En 1972, se origina la transformación de CoopereZeledón R.L. en CoopeAgri El General R.L, y se propone la idea de diversificar los servicios a los productores. Es así como en 1974, continuando con la búsqueda de alternativas para el desarrollo, CoopeAgri instala en la comunidad de Peñas Blancas, el primer Ingenio de la Región Sur del país, con una capacidad de molienda diaria de 1 000 toneladas.

Ante el aumento en la producción de caña de azúcar de la zona, se han realizado grandes inversiones en el Ingenio, logrando llegar en la actualidad a una capacidad de molienda cercana a las 3500 toneladas diarias.

A.1.2 Estructura política.

Asamblea de Delegados: Es la representación de todos los asociados de la empresa, y constituye la máxima autoridad de la Cooperativa. La Asamblea toma las grandes decisiones y define las políticas generales sobre las cuales debe enmarcarse la acción de los demás órganos de la Administración de la Cooperativa. Se realiza cada año y está constituida por Delegados que representan asociados, quienes los nombran y les encargan defender los intereses de toda la organización. Estos delegados son uno por cada cincuenta asociados en el caso de CoopeAgri El General R. L. y uno por cada cien asociados en el caso de CredeCoop R. L, ver figura A.1.

Consejo de Administración: Órgano que se ubica en el nivel de dirección y le corresponde la dirección superior de la Cooperativa, mediante el establecimiento de lineamientos, a los que debe ajustarse la Gerencia General. Sus miembros son elegidos por la Asamblea de Delegados. Está conformado por siete miembros propietarios y dos miembros suplentes.

Comisión Administrativa: Está formada por el Presidente del Consejo de Administración, el Vicepresidente y el Gerente General. Dentro de sus funciones están: La toma de decisiones estratégicas, operativas y de inversión, previa a la próxima reunión del Consejo de Administración, realizar los estudios y trabajos que le encomiende el Consejo.

Comité de Vigilancia: Órgano político encargado de controlar y fiscalizar las actividades que se realizan en la Cooperativa. Está formado por asociados electos por la Asamblea General de Delegados.

Comité de Desarrollo de la Familia: Le corresponde asegurar que las políticas emanadas del Consejo de Administración, en materia de desarrollo de la familia y fortalecimiento de la mujer, sean asumidas por las instancias administrativas correspondientes.

Comité de Educación y Bienestar Social: Tiene la responsabilidad de definir políticas de formación, promoción e información al asociado: Establece programas de Bienestar Social y los somete a consideración de la Asamblea General de Delegados. Su objetivo es que se cumplan las políticas definidas en lo referente al desarrollo técnico, profesional y asociativo de los asociados de la Cooperativa.

Auditoria Interna: Su función es fiscalizar el desarrollo de los principales procesos de gestión operativa de la Organización, verificando que se cumplan las Políticas y Procedimientos establecidos.

A.1.3 Estructura administrativa.

Gerencia General: El Gerente es el representante legal de la Cooperativa; le corresponde la ejecución de los acuerdos del Consejo de Administración y la administración estratégica de todos los negocios de Coopeagri El General R. L. Es responsable ante el Consejo y la Asamblea de todos los actos asociados con su cargo. Tiene supervisión y control directo sobre todas las Gerencias y Jefaturas de primer nivel, ver figura A.1.

Departamento de Recursos Humanos: Está encargado de integrar, mantener y desarrollar el personal de la empresa en coordinación con las Gerencias y Jefaturas. Por medio de Recursos Humanos se realizan los trámites de pago a los trabajadores de toda la empresa. En este departamento se realiza el registro laboral de los trabajadores. Su misión es apoyar la toma de decisiones sobre inversión en Recurso Humano.

Departamento de Informática: Encargado de desarrollar y darle mantenimiento a los programas de cómputo y comunicaciones que se requieren en la empresa, detectar y solucionar los problemas que se presenten en el manejo del equipo computarizado y brindar soporte a los usuarios en el manejo de los sistemas.

Departamento de Desarrollo Asociativo: Responsable de los programas orientados a lograr el desarrollo integral del asociado y su familia a través de procesos de formación, capacitación y asistencia técnica. En este departamento se realizan los trámites de ingreso y egreso a la Cooperativa como asociados.

Planificación Estratégica y Proyectos: Es el área que se encarga de dirigir la formulación y evaluación de los proyectos de inversión y recomendar sobre la ejecución de los mismos, según los resultados del estudio realizado. También se encarga de coordinar la formulación de los planes operativos y presupuestarios de la Cooperativa

Gerencia Financiera: Esta área se encarga de velar por el adecuado manejo financiero de la Cooperativa, mediante la maximización del valor de la misma. Le corresponde el control y manejo de las principales variable financieras mediante las funciones que se desarrollan en los siguientes departamentos: Contabilidad, Tesorería, Gestión Financiera y Servicios Generales

Contabilidad: Se encarga de registrar las transacciones que realice la empresa. Mensualmente y al cierre de año prepara los estados financieros con toda la información generada durante el período.

Tesorería: Su responsabilidad es el adecuado manejo del dinero y otros documentos de valor. Debe programar los pagos y custodiar valores.

Gestión Financiera: Está encargada del análisis financiero, control presupuestario, manejo de inversiones, tramitación de exoneraciones y análisis de partidas de capital de trabajo.

Departamento de Servicios Generales: Tiene a cargo los servicios de limpieza, mensajería, transporte, vigilancia y recepción (responsable del manejo de la central telefónica, fax y radio - comunicador).

Departamento de Mercadeo: Se encarga de maximizar las ventas de la Cooperativa, mediante la investigación de nuevos mercados y las estrategias de mercadeo, basados en la promoción y la publicidad.

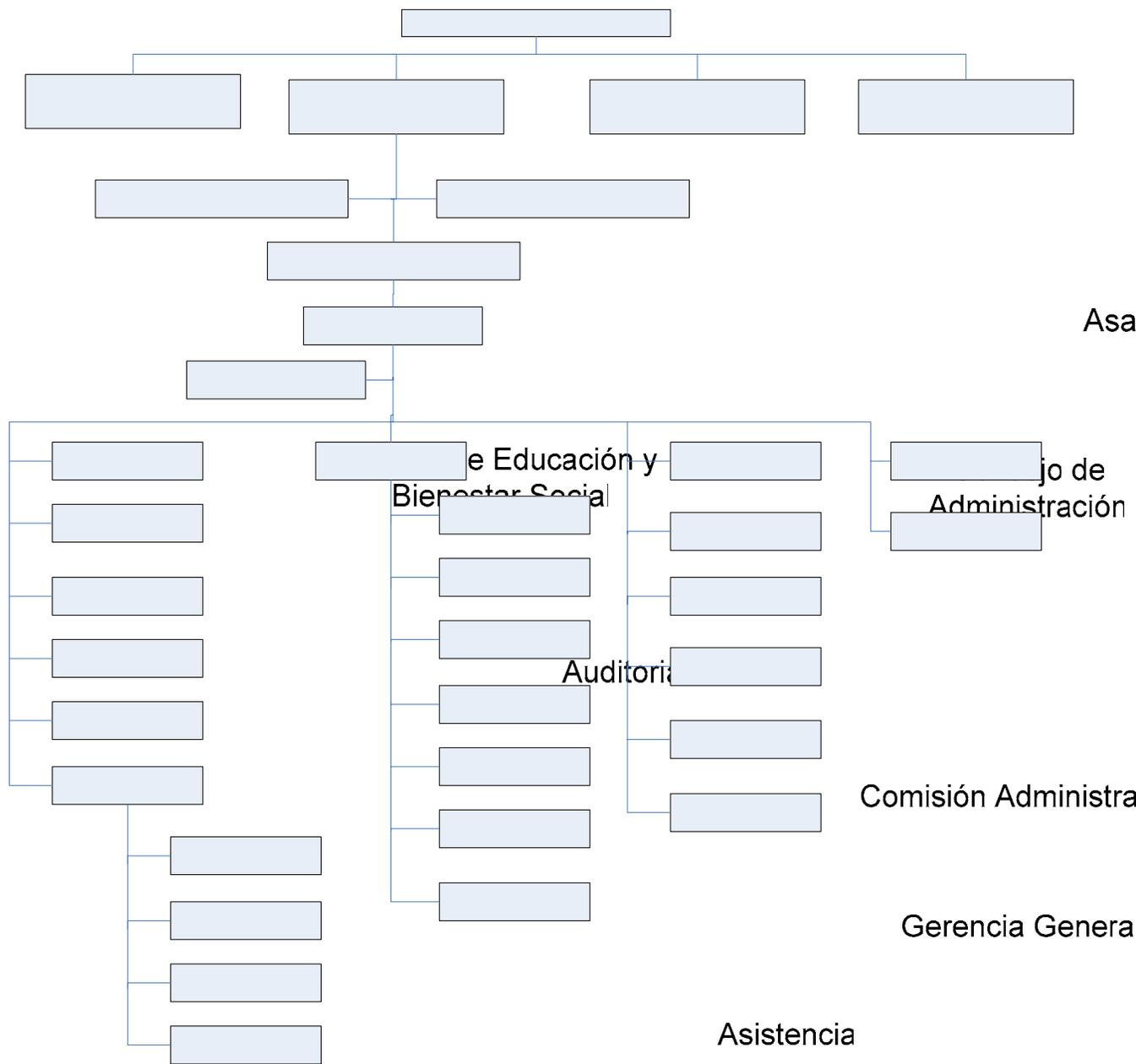


Figura A.1 Estructura organizacional de CoopeAgri R.L.

Mercadeo

Comercial

RRHH

Des Asoc

A.2 Glosario y abreviaturas.

A.2.1 Glosario.

Calandria: Funciona como un sistema intercambiador de calor, el vapor a alta temperatura pasa alrededor de los tubos y el jugo claro por el interior.

Brix: Unidad de medida de la cantidad de sólidos disueltos en un líquido.

Meladura: Jugo con una densidad comprendida entre los 55 y los 65 °Brix.

Vaso: Cuerpo completo del evaporador.

Cristalización: Punto en el cual se empiezan a formar cristales, para el jugo se localiza aproximadamente entre los 78 a 80 °Brix.

Tacho: Instrumentos que reciben la meladura obtenida en los evaporadores y aumentan su densidad hasta la cristalización.

Vapor vegetal: Vapor producido como resultado de la evaporación del agua que contiene el jugo.

A.2.2 Abreviaturas

TBrix: Transmisor de densidad.

TN: Transmisor de nivel.

TNT: Transmisor de nivel de tanque de jugo

CF: Control de flujo.

TF: Transmisor de flujo.

CP: Control de presión.

GPM: Galones por minuto.

ANEXOS.

B.1 Datos técnicos del sensor de densidad DT301



- ✓ Accuracy $\pm 0.0004 \text{ g/cm}^3$ (± 0.1 °Brix).
- ✓ Range $0.5 \text{ g/cm}^3 - 5 \text{ g/cm}^3$.
- ✓ Direct density or concentration readout in engineering units such as g/cm^3 , kg/m^3 , Specific Gravity, °Brix, °Baume, °Plato, °GL, % Solids, % concentration, etc.
- ✓ Integral temperature sensor provides precise temperature compensation.
- ✓ Suitable for dynamic and static liquids.
- ✓ Two wire loop powered.
- ✓ Several different wetted materials.
- ✓ Single integrated unit without moving parts.
- ✓ Factory calibration.
- ✓ In field re-calibration:
 - No standard reference required;
 - No lab calibration required;
 - No process shutdown.
- ✓ Suitable for tank and pipe applications.
- ✓ Ease of maintenance, not requiring periodic cleaning procedures.
- ✓ Standard industrial and sanitary process connection.
- ✓ Remote diagnosis.
- ✓ Digital communication (HART Protocol).

APPLICATIONS

Sugar and Alcohol Processing Plants:

Brix of the sugarcane juice, brix of the must, brix of the syrup, brix of the molasses, brix of the solved juice, calcium solution of the Baume, interface level of the hexane cycle, lime density, INPM degree of the hydrated alcohol, INPM degree of the anhydride alcohol, etc.

Dairy Product Industries:

Condensed milk, Lactose, Yogurt, Cream cheeses, Lactic Acids, etc.

Food Industry:

Vegetable oils, miscellaneous extractions, fruit syrup, starch dissolving, glucose, jams, jellies, sweets, honey, tomato pulp, citrus juices, etc.

Pulp and Paper Industries:

Black liquor, green liquor, white liquor, red liquor, caustic soda concentration, ash dissolving, talc dissolving, pulp dissolving, ink concentration, potassium hydroxide, etc.

Beverage Industry:

Beer (Plato degree in the fermentation process) Soft Drinks (brix of the liquid sugar, etc.), liquors, wines, soluble coffee, malt, tequila, etc.

Chemical Industry:

Acids, concentration/mixture, caustic soda, glycol, salt solution, detergent, toluene, urea, potassium, etc.

Mining Slurries:

Mineral pulp, extraction of thins, flotation, thickening, acid concentration, starch dissolving, scrapers, lime mud.

Petrochemical Industry:

Gas washing water, lubricant oils, aromatic extraction, combustible oils, gasoline, kerosene, water/oil interface level.



DESCRIPTION

DT301

Touché

The DT301* "Touché" Intelligent Concentration/ Density Transmitter is an instrument developed for the continuous, online measurement of liquid concentration and density, directly in the industrial process.

Its pioneer technology consists of a capacitive type differential pressure sensor coupled to a pair of pressure repeaters immersed in the process. A temperature sensor located between the two pressure repeaters is used to compensate the temperature variations in the process fluid. A dedicated software, by means of an algorithm, calculates the fluid density.

Depending on the industrial process, density may be expressed in Brix degree, Gay-Lussac degree, Baumé degree, Plato degree, % of concentration, etc.

Designed for process control applications, these 2-wire transmitters generate a 4-20 mA signal proportional to the concentration/density. Digital communication for remote calibration and monitoring is also provided.



Installation may be done either in open or pressurized tanks, or directly in pipes since the DT301 is suitable for dynamic and static fluids.

The DT301 "Touché" is available in two models:

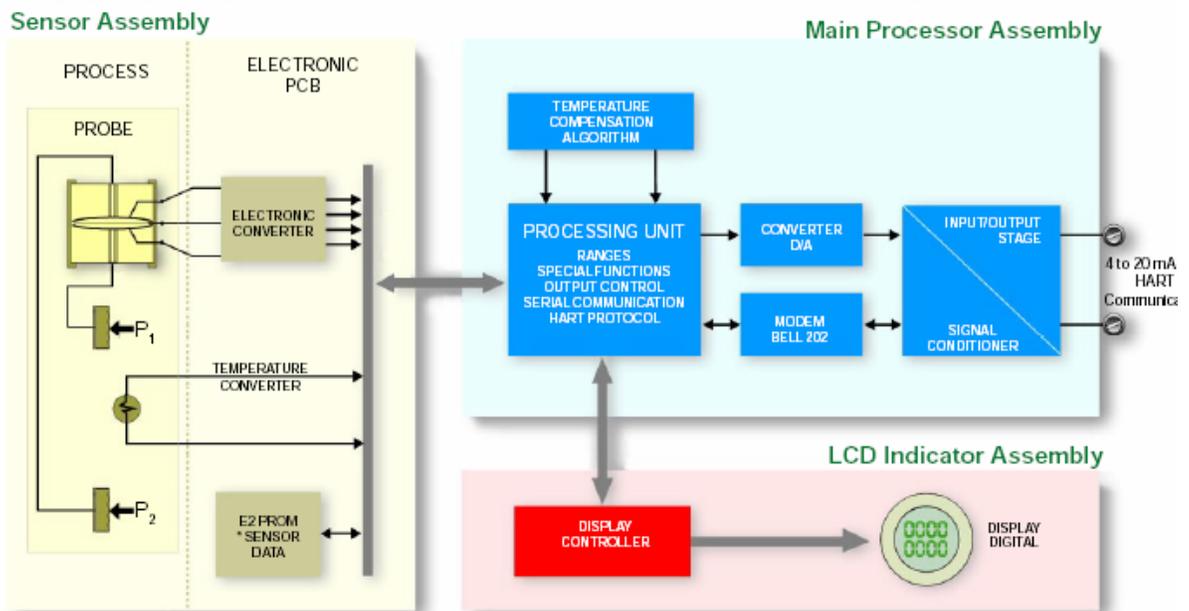
- ✓ DT301I (Industrial Model) for general purpose
- ✓ DT301S (Sanitary Model) for food and other applications where sanitary connections are required.

Both models have two mounting types: top mounting (straight type) and side mounting (curved type).

The Sanitary model uses a Tri-Clamp connection to allow a quick and easy connection and disconnection from the process. Wetted surface finish is 32R_a as standard. These model meets 3A recommendations so that the probe surface is free of crevices where food or bacteria can be collected. 3A is the most widely accepted sanitary standard in the food, drug and beverage industry.

Patent Pending

BLOCK DIAGRAM



B.2 Datos técnicos del sensor de nivel BM 102



BM 102 MICROFLEX

The superior and low-cost alternative to capacitance probes, displacers, ultrasonic meters and pressure transmitters.

- Measurement is independent of dielectric, temperature, pressure and density variations of the media
- Turbulent product surface, dust, vapour and foam have no effect on results
- High accuracy, high repeatability, high resolution
- No calibration needed
- Suitable for all tank shapes

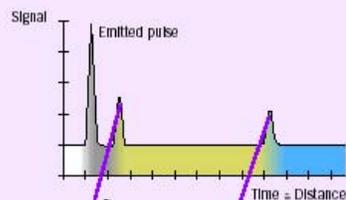
Operating principle

The BM 102 level gauge operates on the TDR principle (Time Domain Reflectometry) which is commonly used for discontinuity tests along a probe.

Micropulses are sent along a probe guide at the velocity of light. As soon as the pulse reaches the product surface, it reflects back to the electronics. Since the velocity of light is a uniform, fixed constant in air or gases, the BM 102 does not require any calibration, commissioning or maintenance.

TDR uses the non-wetted part of the probe, and so is not affected by any product variation.

The distance is directly proportional to the time of travel of the pulse divided by 2.



Ex Ia ATEX



EEx d pending



BM 102

- HART®-protocol as standard
- Minimal cabling costs
- DIN connector or M16 terminal box

- Compact housing with fully potted electronics
- Removable in process
- Vibration resistant

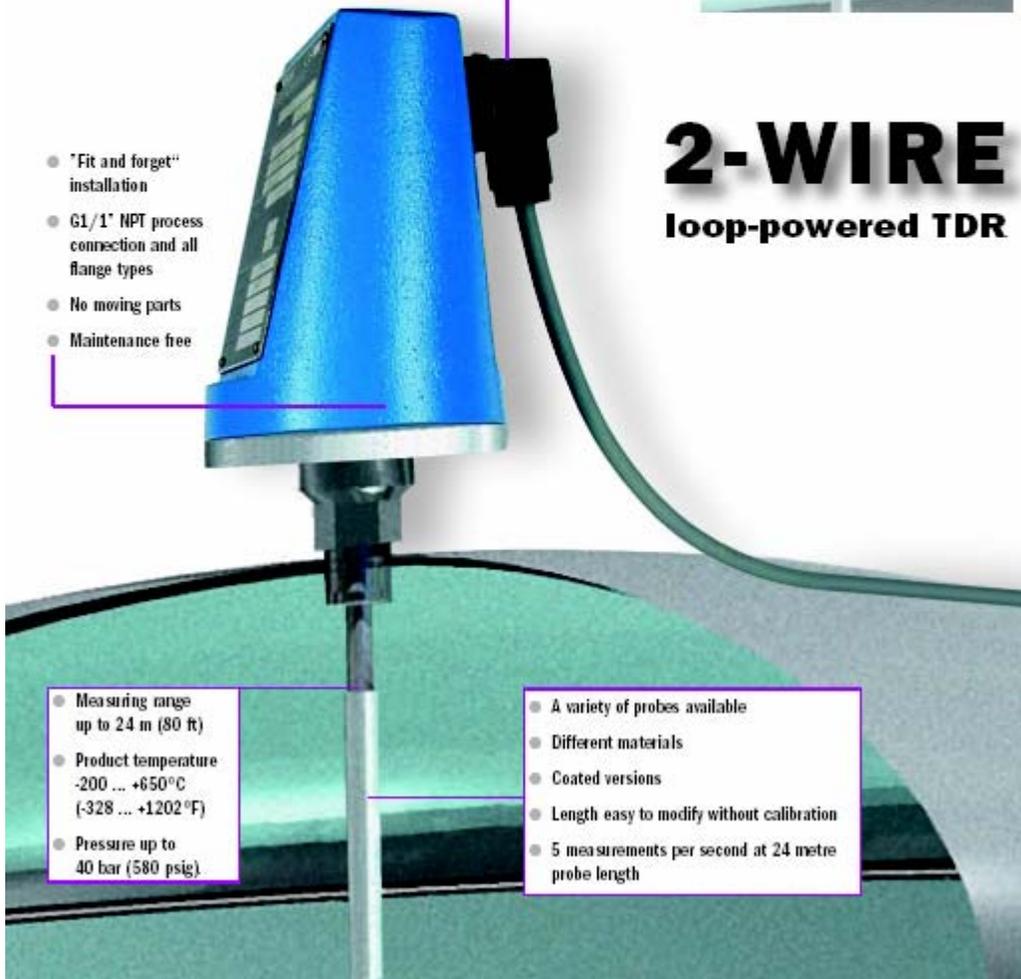


- "Fit and forget" installation
- G1/1" NPT process connection and all flange types
- No moving parts
- Maintenance free

2-WIRE loop-powered TDR

- Measuring range up to 24 m (80 ft)
- Product temperature -200 ... +650°C (-328 ... +1202°F)
- Pressure up to 40 bar (580 psig)

- A variety of probes available
- Different materials
- Coated versions
- Length easy to modify without calibration
- 5 measurements per second at 24 metre probe length



Probe selection guide

Coaxial Type C	Twin cables Type B	Single cable - Type E Single rod - Type F
Main applications:		
<ul style="list-style-type: none"> ● Tank height ≤ 6 m (20 ft) ● Solvents, liquefied gases ● LPG, LNG 	<ul style="list-style-type: none"> ● Tank farms ● Plastic granule silos ● LPG, LNG, NH₃, solvents, oil ● Water storage tanks 	<ul style="list-style-type: none"> ● Cement, limestone, flyash, alumina, carbon black ● All high-viscosity liquids ● Mineral powders ● Plastic granule silos
Recommended in the following cases:		
For clean liquids <ul style="list-style-type: none"> ● Agitated or flowing liquids - the probe acts as a stilling well ● Liquid or vapour spray near the probe ● Can be heated ● Contact possible with metallic object or tank wall ● Very low ϵ_r liquids 	For high silos or tanks with liquids or granules <ul style="list-style-type: none"> ● Up to 24 m (80 ft) ● For tanks with little head clearance ● For small nozzles ● For low ϵ_r ● Close to wall mounting possible 	For clean and contaminated liquids or fine powders <ul style="list-style-type: none"> ● For stilling wells (calibration required) ● Crystallizing products with FEP coating ● Highly conductive foams ● High temperature applications without spacers
Avoid:		
<ul style="list-style-type: none"> ● Crystallizing liquids ● Liquids with solid particles ● Adhesive products ● Powders ● Viscous fluids (e.g. crude oil) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Agitated liquids without probe anchoring ● Product temperature > 150°C (302°F) (max. limit with optional PTFE spacers) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Small nozzle diameters ● High nozzle heights
<p>Tip: Direct mounting on the tank roof gives you a true "fit-and-forget" device.</p>		

Technical data

1 Range of application	Continuous level measurement for liquids, solids and powders
2 Operating mode / system structure	
Measuring principle	Time Domain Reflectometry
Modularity	The measuring system comprises signal converter, probe, sealing system and process connection
Signal transmission	4-20 mA and digital communication (HART®)
3 Input	
Measured variable	
Primary variable	Distance between a reference point (as standard: the tank mounting flange) and a reflecting surface (product surface)
Secondary variable	Level, volume, flow (for open channel measurement)
Measuring range	
Useful measuring range	Dependent on probe type, reflection properties of the product, installation position and on interference reflections
Minimum tank height	0.15 m (0.5 ft)
Length of probe	
rod probe	≤ 6 m (19.7 ft)
cable probe	≤ 24 m (78.7 ft)
coaxial probe	≤ 6 m (19.7 ft)
Dead zone	
Upper dead zone	Minimum measuring distance between mounting flange (reference point) and product surface.
twin probe	$\epsilon_r < 10 = 300 \text{ mm (11.8")}$ $\epsilon_r \geq 10 = 150 \text{ mm (5.9")}$
single probe	$\epsilon_r < 10 = 400 \text{ mm (15.8")}$ $\epsilon_r \geq 10 = 300 \text{ mm (11.8")}$
coaxial probe	0 mm (4")
Lower dead zone	100 mm (3.9") + length of the weight or fastening device
4 Output	
Current output HART®	passive, HART®-protocol
Current output Ex-ia HART®	intrinsically safe, passive, HART®-protocol
Output signal	4-20 mA
Failure signal	22 mA
Load impedance	0-750 Ω

B.3 Datos técnicos del transmisor de nivel LD301

Technical Characteristics

LD300 Series

Functional Specifications

Process Fluid	Liquid, gas or vapor.
Output and Communication Protocol	<p>HART®: Two-wire, 4-20 mA according to NAMUR NE43 specification, with super-imposed digital communication (HART® Protocol).</p> <p>FOUNDATION Fieldbus™ and PROFIBUS PA: Digital only. Complies with IEC 61158-2:2000 (H1): 31.25 kbit/s voltage mode, bus powered.</p>
Power Supply / Current Consumption	<p>HART®: 12 to 45 Vdc.</p> <p>FOUNDATION Fieldbus™ and PROFIBUS PA: Bus powered: 9 - 32 Vdc. Quiescent current consumption: 12 mA.</p>
Indicator	4½-digit numerical and 5-character alphanumeric LCD indicator (optional).
Hazardous Area Certifications	<p>HART®, FOUNDATION Fieldbus™ and PROFIBUS PA: Explosion proof, weather proof, intrinsically safe (CENELEC, NBR, CSA and FM standards), dust ignition proof for Class II and III, non incendive (CSA and FM) and coal mines (CENELEC).</p> <p>FOUNDATION Fieldbus™ and PROFIBUS PA: Complies with FISCO (PTB-W-53e report).</p>
European Directive Information	<p>PED Directive (97/23/EC) - Pressure Equipment Directive This product is in compliance with the directive and was designed and manufactured in accordance with sound engineering practice using several standards from ANSI, ASTM, DIN and JIS. Quality management system certified by BVQI (Bureau Veritas Quality International).</p> <p>EMC Directive (89/336/EEC) - Electromagnetic Compatibility The EMC test was performed according to standard IEC 61326:2002.</p> <p>ATEX Directive (94/9/EC) – Explosive Atmosphere, Hazardous Location This product was certified according to NEMKO and EXAM (old DMT) European Standards. The EC declarations of conformity for all applicable European directives for this product can be found at www.smar.com.</p>
Zero and Span Adjustments	Noninteractive, via digital communication.
Failure Alarm (Diagnostics)	<p>Detailed diagnostics through communication for all protocols.</p> <p>HART®: In case of sensor or circuit failure, the self diagnostics drives the output to 3.6 or 21.0 mA, according to the user's choice and NAMUR NE43 specification.</p> <p>FOUNDATION Fieldbus™: For sensor circuit failures, events are generated and status is sent to link outputs. Detailed diagnostics are available in the contained parameters.</p> <p>PROFIBUS PA: For sensor or circuit failures, status is sent to output parameters. Detailed diagnostics are available in the contained parameters.</p>

Temperature Limits	<p>Ambient: -40 to 85 °C (-40 to 185 °F)</p> <p>Process: -40 to 100 °C (-40 to 212 °F) (Silicone Oil)</p> <p>0 to 85 °C (-32 to 185 °F) (Halocarbon and Fluorolube Oil)</p> <p>-20 to 85 °C (-4 to 185 °F) (Krytox Oil and Fomblim Oil)</p> <p>-25 to 85 °C (-13 to 185 °F) (Viton O'Ring)</p> <p>-40 to 150 °C (-40 to 302 °F) (LD301L)</p> <p>Storage: -40 to 100 °C (-40 to 212 °F)</p> <p>Digital Display: -20 to 80 °C (-4 to 176 °F)</p> <p>-40 to 85 °C (-40 to 185 °F) (without damage)</p>
Turn-on Time	<p>HART®: Performs within specifications in less than 5 seconds after power is applied to the transmitter.</p> <p>FOUNDATION Fieldbus™ and PROFIBUS PA: Performs within specifications in less than 10 seconds after power is applied to the transmitter.</p>
Configuration	<p>HART®: By digital communication (HART® protocol) using the configuration software CONF401, DDCON (for windows), HPC301 or HPC401 (for Palms). It can also be configured using DD and FDT/DTM tools, and can be partially configured through local adjustment.</p> <p>FOUNDATION Fieldbus™ and PROFIBUS PA: Basic configuration may be done using the local adjustment magnetic tool if device is fitted with display. Complete configuration is possible using configuration tools.</p>
Volumetric Displacement	Less than 0.15 cm ³ (0.01 in ³)
Overpressure and Static Pressure Limits	<p>From 3.45 kPa abs. (0.5 psia)* to: 0.5 MPa (72.52 psi) for range 0 8 MPa (1150 psi) for range 1 16 MPa (2300 psi) for ranges 2, 3 & 4 32 MPa (4600 psi) for models H & A5 40 MPa (5800 psi) for model M5 52 MPa (7500 psi) for model M6 <i>* except the LD300A model</i></p> <p>Flange Test Pressure: 60 MPa (8570 psi)</p> <p>For ANSI/DIN Level flanges (LD300L models): 150lb: 6 psia to 230 psi (-0.6 to 16 bar) at 38 °C (100.8 °F) 300lb: 6 psia to 600 psi (-0.6 to 41 bar) at 38 °C (100.8 °F) 600lb: 6 psia to 1200 psi (-0.6 to 83 bar) at 38 °C (100.8 °F)</p> <p>PN10/16: -60 kPa to 1.4 MPa at 120 °C (248 °F) PN25/40: -60 kPa to 4 MPa at 120 °C (248 °F)</p> <p>The above pressures will not damage the transmitter, but a new calibration may be necessary.</p>
Humidity Limits	0 to 100% RH
Damping Adjustment	User configurable from 0 to 128 seconds (via digital communication).

Performance Specifications

Reference Conditions	Span starting at zero, temperature of 25 °C (77 °F), atmospheric pressure, power supply of 24 Vdc, silicone oil fill fluid, isolating diaphragms in 316L SST and digital trim equal to lower and upper range values.
-----------------------------	--

B.4 Datos técnicos del PLC modelo LC 700.

LC700

PROGRAMMABLE CONTROLLER

Introduction

Stretching up to make control easier all over the world.

Since 1978, Smar has been a powerful contributor in setting the pace for the evolution of technology in the automation field.

New products and new ideas, to bring solutions closer to the user's dreams.

The first 16 bit digital controller, the first transmitter with embedded PID control, the first commercial line of Fieldbus products for process automation, are examples of the pioneering achievements of Smar.

The LC700 now joins the family of Smar products setting up the bridge between process and manufacturing automation and Fieldbus.

Just to make your job easier!



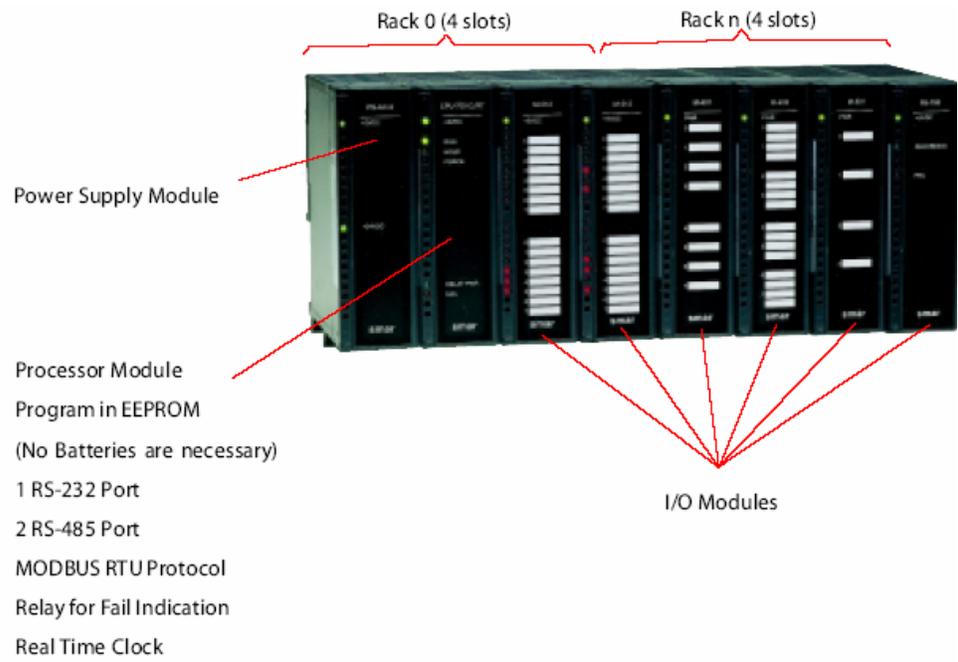
Highlights

- Compact and totally modular concept.
- Program retention with EEPROM (No more batteries to change).
- 1024 Discrete points and 1024 analog variables.
- Ready for FOUNDATION™ Fieldbus.
- Ladder Logic Programming IEC-1131-3.
- Very easy to learn and use configurator (Windows™ 9x, NT).
- User defined function capability.
- Remote I/O for long distance data transfer.
- The most complete set of function blocks dedicated to process control (PID, Totalization, Setpoint Generator, Linearization,...).
- CPU module with communications channels improving the number of master computers access.
- 10BaseT twisted pair Ethernet module (ENET-700) adding MODBUS/TCP capability.
- Redundant Power Supply module.

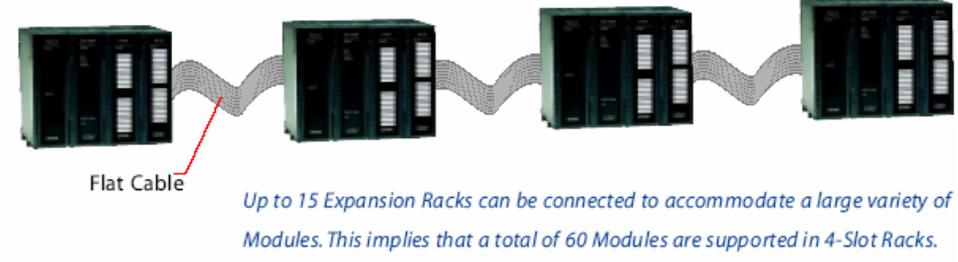
NEW!

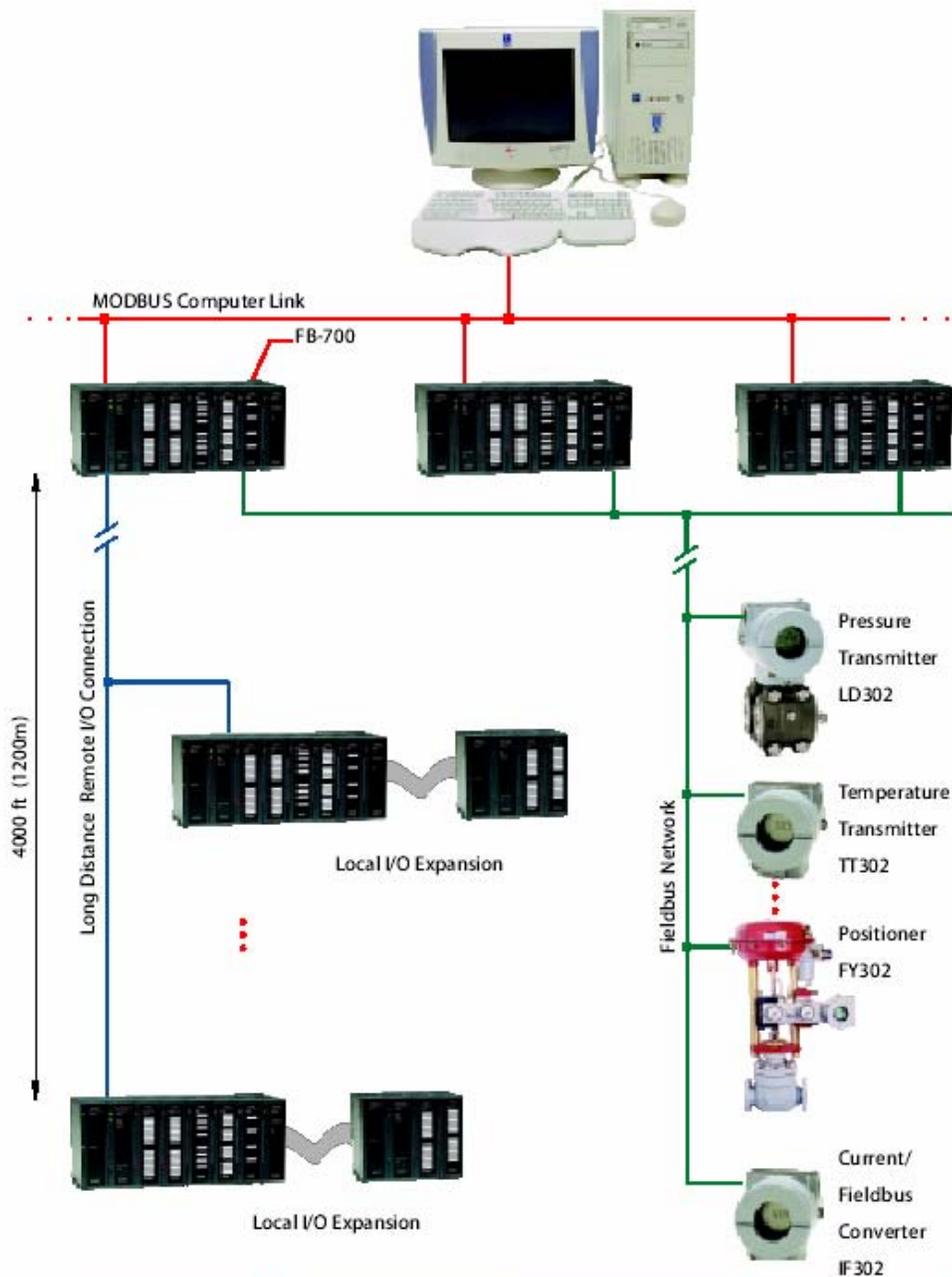
NEW!

NEW!



Local I/O Expansion





MODBUS	FIELDBUS	I/O REMOTE	LOCAL EXPANSION
<ul style="list-style-type: none"> - Configuration and optimization - Supervision and operation Modem/ - Radio connection - Optic fiber connection - Interface with modbus plus 	<ul style="list-style-type: none"> - FB700 Module for integration with Fieldbus Foundation Devices - FB700 Module can also change information, peer-to-peer - Cable saving on distributed applications 	<ul style="list-style-type: none"> - Economic way of accessing remote I/O points - High speed data scanning - Considerable cable saving on distributed applications 	<ul style="list-style-type: none"> - Flat cable connection to add racks to support more I/O modules

B.5 Datos técnicos del transmisor de flujo (Optiflux 1000)

OPTIFLUX 1000

The economical solution

The OPTIFLUX 1000 electromagnetic flow sensor is an economical solution for a wide range of applications.

The flowmeter can be used in applications (including various aqueous solutions), where other measurement techniques were previously used.



Fields of application

Industries

- Water distribution
- (Waste) water treatment
- HVAC
- Agriculture
- Machinery

Application examples

- Water circulation and treatment e.g. in swimming pools and recreation facilities
- Sprinkler irrigation systems
- Fertilizer distribution
- Fire fighting systems
- Buildings and offices

OPTIFLUX 1000

The economical solution

Highlights

- Basic and fully functional sandwich flowmeter for a wide range of applications
- Quick and easy to install and operate
- Favourable price-performance ratio

Product features

- Flangeless sandwich design
- Standard materials:
 - PFA liner
 - Hastelloy electrodes
- Excellent chemical resistance
- Maintenance free
- Minimum conductivity of 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$



OPTIFLUX 1000

The responsibility as to the suitability, intended use and corrosion resistance of the materials used in their construction rests solely with the purchaser.

Technical data

● Standard ○ Optional - On request

Nominal diameter	ANSI [inch]	3/8"	1/2"	1"	1 1/2"	2"	3"	4"	6"
	DN [mm]	10	15	25	40	50	80	100	150
Process flange standard*	EN 1092-1 - PN 40	●	●	●	●	●	●	-	-
	EN 1092-1 - PN 16	-	-	-	-	-	-	●	●
	ANSI B16.5 - 150 lbs RF	●	●	●	●	●	●	●	●
	ANSI B16.5 - 300 lbs RF	○	○	○	○	○	○	○	-
	JIS 20 K	●	●	●	●	●	●	●	-
	JIS 10 K	-	-	-	-	-	-	-	●
* OPTIFLUX 1000 Pressure limits in separate table. Note: DN 10 (3/8") requires DN 15 (1/2") process flanges.									
Liner	PFA	●	●	●	●	●	●	●	●
Electrodes	Hastelloy C4	●	●	●	●	●	●	●	●
Grounding rings	Integrated st. st. 1.4571 (AISI 316 Ti)	●	●	-	-	-	-	-	-
	Separate st. st. 1.4571 (AISI 316 Ti)	-	-	○	○	○	○	○	○
Stud bolts and nuts*	Rubber centering sleeves	-	-	-	●	●	●	●	●
	Steel	○	○	○	○	○	○	○	○
	Stainless steel	○	○	○	○	○	○	○	○
* Gaskets not included.									
Materials used*	Measuring tube	Austenitic stainless steel							
	Housing (polyurethane coated)	GTW-S 38				Sheet steel			
	Connection box (polyurethane coated)	Die-cast aluminium							
* Other materials on request.									
Protection category	Standard	IP 66 / 67 eq. NEMA 4/4X / 6							
	Optional	IP 68 eq. NEMA 6							
Insulation class	E								
Approvals*	Non-Ex	●							
	* for flow sensor only.								
Versions	Compact + IFC 300 C	●							
	Separate + IFC 300 F, R, W	●							
	Compact + IFC 010 C	●							
	Separate + IFC 010 W	●							
Vacuum load	0 mbar/ 0 psi absolute								
Electrical conductivity	Non-water	min. 5 µS/cm							
	Water	min. 20 µS/cm							

Process flange standard	Operating pressure			
	min.	max.	min.	max.
ANSI B16.5 - 150 lbs RF	0	16 bar	0	232 psig
ANSI B16.5 - 300 lbs RF	0	16 bar	0	232 psig
EN 1092-1 - PN 16	0	16 bar	0	232 psig
EN 1092-1 - PN 40	0	16 bar	0	232 psig
JIS 10 K	0	10 bar	0	145 psig
JIS 20 K	0	16 bar	0	232 psig

OPTIFLUX 1000

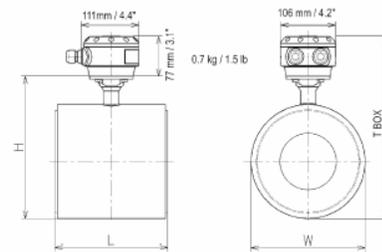
Temperature range

	Process		Ambient	
	min.	max.	min.	max.
Separate flow sensor	-25°C	120°C	-25°C	60°C
Compact with IFC 300	-25°C	120°C	-25°C	50°C
OPTIFLUX 1300 C	-25°C	120°C	-25°C	40°C
Compact with IFC 010	-25°C	120°C	-25°C	40°C

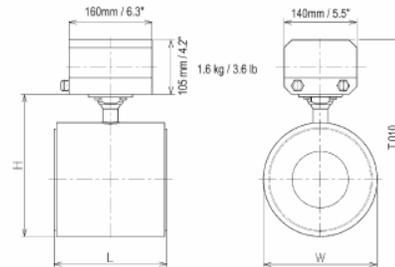
	Process		Ambient	
	min.	max.	min.	max.
Separate flow sensor	-13°F	248°F	-13°F	140°F
Compact with IFC 300	-13°F	248°F	-13°F	122°F
OPTIFLUX 1300 C	-13°F	248°F	-13°F	104°F
Compact with IFC 010	-13°F	248°F	-13°F	104°F

Dimensions and weights

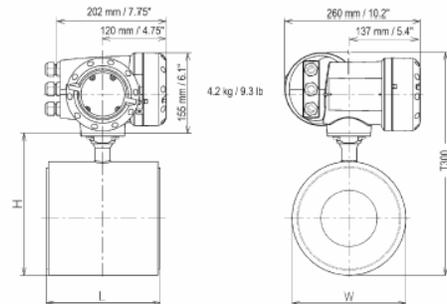
OPTIFLUX 1000 F



OPTIFLUX 1010 C



OPTIFLUX 1300 C



Nominal size DN	Dimensions in mm						Approx. weight in kg*
	L	H	W	T _{box}	T ₀₁₀	T ₃₀₀	
10	68	137	47	214	242	292	1.7
15	68	137	47	214	242	292	1.7
25	54	147	66	224	252	302	1.7
40	78	162	82	239	267	317	2.6
50	100	151	101	228	256	306	4.2
80	150	180	130	257	285	335	5.7
100	200	207	156	284	312	362	10.5
150	200	271	219	348	376	426	15.0

Nominal size ANSI	Dimensions in inch						Approx. weight in lbs*
	L	H	W	T _{box}	T ₀₁₀	T ₃₀₀	
3/8"	2.68	5.39	1.85	8.43	9.53	11.50	3.7
1/2"	2.68	5.39	1.85	8.43	9.53	11.50	3.7
1"	2.13	5.79	2.60	8.82	9.92	11.89	3.7
1 1/2"	3.07	6.38	3.23	9.41	10.51	12.48	5.7
2"	3.94	5.94	3.98	8.98	10.08	12.05	9.3
3"	5.91	7.09	5.12	10.12	11.22	13.19	12.6
4"	7.87	8.15	6.14	11.18	12.28	14.25	23.1
6"	7.87	10.67	8.62	13.70	14.80	16.77	33.1

B.6 Datos técnicos de los transmisores de presión (LD291).

LD291

DESCRIPTION

The series LD29X is the economical alternative in routine gage pressure measurement. This lightweight design eliminates the need for mounting brackets and transmitter supports in many applications.

The model LD291 offers digital HART® based communication simplifying calibration and providing remote diagnostics.

Its microprocessor-based electronics allow for total interchangeability with SMAR capacitive sensors. It automatically corrects sensor characteristic changes caused by temperature fluctuations.

All members of the LD29X series use SMAR's field proven capacitive sensors. Its special design allows a direct process connection and an optional LCD indicator can be added to provide additional operations and local indication.

Basiles the LD291 was developed according to the international safety standards to attend the functional safety requirements in plants that need safety and reliability to protect people, ambient and assets, etc.

The LD291 has FMEDA analyses allowing it to work in safety areas according to SIL requirements and making easier to the user the calculation to Safety Integrity Level (SIL).

MTBF is a basic measure of product and it is calculated adding the MTTR and MTTF. MTTR is the mean time to execute maintenance on all of the removable items in a product. It is the most common measure of maintainability. MTTF is the mean time expected until the first failure of a piece of equipment. It is the inverse of the failure rate.



- ✓ 0 – 1.25 kPa to 0 – 25 MPa (0 – 5 inH₂O to 0 – 3600 psi)
- ✓ ±0.1% accuracy of the calibrated range
- ✓ Updating time of output current in 100ms
- ✓ Output current resolution of 0.75µA/bit
- ✓ With high performance mathematical co-processor
- ✓ One single electronic board for all models
- ✓ Accepts calibration from URL to URL/40
- ✓ Wetted parts in 316 SST or Hastelloy
- ✓ Digital display (optional)
- ✓ Zero, span and damping adjustment through HART® local switches (only if fitted with display)
- ✓ Digital electronics, sensor and communication
- ✓ Self diagnostics
- ✓ Weather proof, explosion proof and intrinsically safe
- ✓ FMEDA (Failure Modes, Effects and Diagnostic) Analysis
- ✓ MTBF (Mean Time Between Failures) of 239 years
- ✓ MTTR (Mean Time to Repair) of 18 minutes
- ✓ MTTF (Mean Time to Failure) of 239 years
- ✓ Applicable in safety areas according to SIL (Safety Integrity Level) requirements
- ✓ Write protection by hardware
- ✓ Easy upgrade for Foundation Fieldbus and Profibus PA technologies
- ✓ Designed and manufactured according to ISO 9001 standards

smar

Functional Specifications

Service

Liquid, gas or vapor application

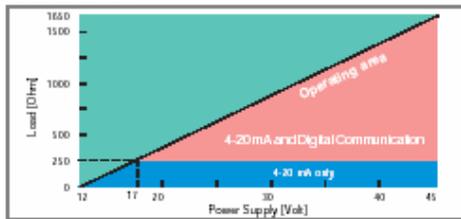
Output

Two wire, 4-20 mA with HART® superimposed digital communication signal. Output current according to NAMUR-NE 43 standard.

Power Supply

12 - 45 Vdc

Load Limitation



Indicator

Optional 4½-digit numerical and 5-character alphanumeric LCD indicator.

Hazardous Area Certifications

Explosion proof, weather proof and intrinsically safe (CENELEC, CSA and FM standards).

Zero and Span Adjustment

By Configurator or Local Adjustment from 0 to 0.975 URL. URL = Upper Range Limit.

Temperature Limits

Ambient: -40 to 85 °C (-40 to 185 °F).
 Process: -40 to 100 °C (-40 to 212 °F) (Silicone Oil).
 0 to 85 °C (-32 to 185 °F) (Fluorolube Oil).
 Storage: -40 to 100 °C (-40 to 212 °F).
 Display: -10 to 60 °C (14 to 140 °F) operation.
 -40 to 85 °C (-40 to 185 °F) without damage.

Failure Alarm

In case of sensor or circuit failure, the self diagnostics drives the output to 3.6 or 21.0 mA and according to user's choice.

Turn-on Time

Performs within specifications in less than 10 seconds after power is applied to the transmitter.

Overpressure Limits

14 MPa (2000 psi) for ranges 2, 3 and 4
 31 MPa (4500 psi) for range 5

These overpressures will not damage the transmitter, but a new calibration may be necessary.

Humidity Limits

0 to 100% RH.

Damping Adjustment

User configurable, from any value higher than 0 seconds plus intrinsic sensor response time (0.2s).

Configuration

By digital communication (HART® protocol) using the Configuration Interface CONF301 or the Hart Pocket Configurator HPC301. Can be done partially, through local adjustment.

Performance Specifications

NEW

Accuracy

± 0.1% of span (for span ≥ 0.1 URL).
 ± 0.05 (1 + (0.1 URL/span))% of span (for span < 0.1 URL).

For Ranges 5:

± 0.2% of span (for span ≥ 0.1 URL).
 ± 0.1 (1 + (0.1 URL/span))% of span (for span < 0.1 URL).

Stability

± 0.2% of URL for 1 year.

Temperature Effect

± (0.18% URL + 0.18% span) per 20 °C (36 °F).

Power Supply Effect

0.005% of calibrated span per volt.

Mounting Position Effect

Zero shift of up to 250 Pa (1 inH₂O) which can be calibrated out. No span effect.

Electro-Magnetic Effect

Designed to comply with IEC 61000-6-2:1999, IEC 61000-6-4:1997 and IEC 61326:2002 standards.

Physical Specifications

Electrical Connection

½ -14 NPT, Pg 13,5 or M20 x 1,5

Process Connection

See ordering code.

Wetted Parts

- Isolating Diaphragms and Process Connection
316L SST, Hastelloy C276.

Nonwetted Parts

- Electronic Housing
Injected aluminum with polyester painting or 316 SST (NEMA 4X, IP67).
- Fill Fluid
Silicone or Fluorolube Oil.
- Cover O-Rings
Buna N.
- Mounting Bracket
Optional universal mounting bracket for surface or vertical/horizontal 2" pipe (DN 50) carbon steel with polyester painting or 316 SST. Accessories (bolts, nuts, washers and U-clamp) in carbon steel or 316 SST.
- Identification Plate
316 SST.

Approximate Weights

< 2.0 kg (4lb): aluminum housing without mounting bracket.

Smart Pressure Transmitters are protected by USA patent number 6,433,791