

Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



Sistema de control automático y monitoreo del piso de tachos

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

Iver Francisco Aguilar Miranda

Cartago, junio de 2013

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

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



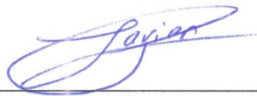
Ing. Arys Carrasquilla Batista

Profesora lectora



Ing. Roberto Pereira Arroyo

Profesor lector



Ing. Javier Pérez Rodríguez

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, junio de 2013

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

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

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

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

Cartago, junio de 2013



Iver Francisco Aguilar Miranda

Cédula: 5 0351 0051

RESUMEN

Azucarera El Viejo S.A. es una de las plantas de fabricación de azúcar más grandes del país, en el que la tecnología se aplica día a día. Dentro del ingenio, que es donde se procesa la caña de azúcar, está el Piso de Tachos, donde se produce la cristalización, formación y crecimiento de los granos del azúcar.

Los Tachos son evaporadores de simple efecto que trabajan al vacío, los cuales se alimentan de mieles y producen masas, tienen involucradas variables importantes para su correcto funcionamiento como el °Brix, el nivel, la temperatura, el vacío y el vapor, con las cuales se cocinan estas masas, mediante la concentración y supersaturación para lograr obtener cristales claros, uniformes y de buen tamaño para la venta comercial.

La obtención de estos cristales sin ayuda de equipo electrónico no es sencilla, por lo que se implementó un sistema SCADA de monitoreo del °Brix, el nivel y la temperatura de 4 de los 9 tachos del ingenio, en el cual el tacho #9 fue escogido para ser automatizado mediante el empleo de controladores digitales, válvulas neumáticas y lógicas de control para seguir la receta utilizada por los trabajadores de los tachos durante años.

Este informe detalla la implementación de ese sistema con el cual se logró obtener una mejor calidad en los granos de azúcar, conocer el estado real de la concentración y niveles de los tachos y además, brindarle una herramienta al “tachero” para ayudarlo en sus labores diarias del trabajo.

Palabras clave:

Tachos, SCADA, servidor OPC, cristalización, masas, desarrollo, sistema de doble magma, templeas, mieles, cd600 plus, indusoft, microondas, brix, hydrotrac, automatización de tachos, azúcar.

ABSTRAC

Azucarera El Viejo S.A. is one of the biggest sugar factories in Costa Rica where the technology is the best allied. The sugar cane is processed by the sugar mill, inside there, are nine vacuum pans called “Tachos”, those vacuum pans produce the crystallization and crystal growing for commercial sugar.

The Vacuum pans use the Double Magma System cooking molasses, magmas and massecuite with vapor. This process has three important variables involve, Brix grade, level and temperature.

To obtain the best sugar crystals, the massecuite must be granting the supersaturation point of concentration. The concentration measure is very difficult to acquire without electronics devices.

By this reason this report is based about a SCADA system implemented in the vacuum pans for monitoring and automatic controlling the massecuite procedure.

The system consists in the acquisition of data provided by microwaves and differential pressure sensors in two digital controllers, connected through an Ethernet device using an OPC server and SCADA software called Indusoft to control pneumatics valves and positioners.

The implementation of this electronic automatic system reduced the sugar crystal lost in final molasses and produced more clear, big and uniform blocks of sugar and a standard procedure of massecuite cooking.

Keywords:

Vacuun Pans, Tachos, SCADA, OPC Server, Crystallization, massecuite, molasses, double magma, sugar, cd600 plus, indusoft, microwaves, brix, hydrotrac, vacuum pans automatization, sugar.

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por mi vida y por las gratas experiencias que me ha dejado vivir y disfrutar, por darme fuerzas cuando más lo necesitaba y por permitirme salir adelante en todas las pruebas y dificultades que se presentan en este diario vivir.

A mis padres Francisco Aguilar y Margoth Miranda por regalarme la dicha de nacer y crecer en un hogar amoroso, rodeado de entendimiento y apoyo, por impulsarme a estudiar y lograr mis metas, por orientarme y brindarme sabios consejos, por siempre tener fe en mí y nunca dejarme flaquear en el duro camino de los estudios.

A mis hermanos Keylor y Falon Melissa, por su compañía desde mi infancia, por todos los momentos que disfrutamos en familia, por todas las horas que pasamos juntos cuando los estudios me permitieron ir de paseo a mi casa y por el cariño que siempre me han demostrado.

A mi sobrina Delany por traer muchas bendiciones y sonrisas a la familia.

A mi pareja Katherine Melissa, por entrar a mi vida cuando más necesitaba aliento y apoyo, por darme una razón más para lograr mis metas, por apoyarme y recordarme todos los días que era posible lograr el sueño de graduarme de esta carrera.

A mis familiares y amistades que siempre vieron en mí a un futuro ingeniero y me dieron esperanzas y fuerzas para continuar.

A todos ellos dedico uno de mis más grandes logros de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a don Marvin Alfaro que muy amable y respetuosamente me atendió un día por teléfono cuando buscaba un lugar para realizar el proyecto y me dio la oportunidad de realizarlo en el ingenio. Por permitirme aprender tanto, en un lugar que es toda una escuela para mi profesión.

A Brian Cambell, Alfonso Gómez y don José Álvaro Jenkins que junto a don Marvin me brindaron todos los recursos necesarios y la confianza para desarrollar y demostrar mis habilidades en la electrónica.

A Juan Carlos Matarrita por asesorarme y guiarme en el increíble mundo que se encierra en un ingenio azucarero, por todo el conocimiento compartido y las horas de ayudas y explicaciones.

A don Ulises Osegueda por orientarme y despejar mis dudas en el difícil proceso de la obtención del azúcar, por sus felicitaciones al lograr obtener resultados satisfactorios.

A Marco Villegas por todos los documentos que me facilitó y por enseñarme tantos principios químicos que me ayudaron en mi proyecto.

A Sigilfredo Fernández por todas las horas que dedicó a la puesta en marcha del proyecto, por sus consejos y experiencia,

A don Jaime, Alonso, Wilbert, Roberto, Rubén, Kelly, Mingo, Braulio y Ernesto por pasar contestando tantas preguntas que les hice en el diario trabajar de los tacheros.

Al personal del Departamento de Instrumentación, Ingeniería, Ingenio Industrial y a toda la Azucarera El Viejo S.A.

Les agradezco sinceramente el esfuerzo que hicieron junto a mí para concretar este proyecto.

INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Problema existente e importancia de su solución.....	1
1.2 Solución seleccionada.....	4
Capítulo 2: Meta y objetivos	7
2.1 Meta	7
2.2 Objetivo general	7
2.3 Objetivos específicos	7
2.3.1 Objetivos de hardware	7
2.3.2 Objetivos de software.....	8
2.3.3 Objetivos de documentación	8
2.3.4 Objetivos de implementación	8
Capítulo 3: Marco Teórico	10
3.1 Descripción del Proceso a mejorar.....	10
3.1.1 Proceso industrial de obtención del azúcar de caña.....	10
3.1.2 Sistema de Doble Magma y Tres Templas	13
3.1.3 Proceso de Cristalización del azúcar.	16
3.2 Antecedentes Bibliográficos	21
3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.	23
3.3.1 Supersaturación y °Brix.....	23
3.3.2 Pol y Pureza.....	25
3.3.3 Tachos de calandria.....	25
3.3.4 Medición de °Brix por microondas.....	26
3.3.5 Medición de nivel por presión diferencial	28
3.3.6 Protocolo Industrial HART	30
3.3.7 Sistema de control de lazo cerrado.....	31
3.3.8 Controlador PID	31
3.3.9 Controlador Lógico Programable PLC	33
3.3.10 Método de Conectividad OPC.....	34
3.3.11 Sistema SCADA.....	38

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico	40
4.1 Reconocimiento y definición del problema	40
4.2 Obtención y análisis de la información	41
4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de la solución	42
4.4 Implementación de la solución	43
4.4.1 Calibración de los transmisores	43
4.4.2 Conexión de los transmisores a controladores	43
4.4.3 Conexión de controladores a PC	44
4.4.4 Servidor OPC	44
4.4.5 Software SCADA.....	44
4.4.6 Válvulas con actuador y posicionador neumático	44
4.5 Reevaluación y rediseño	44
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución	45
5.1 Análisis de soluciones y selección final.....	46
5.1.1 Transmisor de °Brix.....	46
5.1.2 Controlador Digital Programable	48
5.1.3 Medio de comunicación eléctrica	49
5.2 Descripción del hardware	50
5.2.1 Transmisores utilizados	50
5.2.2 Controlador SMAR CD600 Plus.....	54
5.2.3 Interfaz de conversión ENET-710	55
5.2.4 Válvulas neumáticas	56
5.3 Descripción del software	57
5.3.1 Hydronix Hydro-Com.....	58
5.3.2 Configurador y Programador CONF600.....	60
5.3.3 Servidor OPC TagList600	61
5.3.4 INDUSOFT Web Studio	62
5.3.5 Rutina de Control	67
Capítulo 6: Análisis de resultados	71
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones.....	84
7.1 Conclusiones.....	84

7.2 Recomendaciones.....	85
Bibliografía.....	86
Apéndices.....	88
A.1 Abreviaturas y glosario.....	88
Anexos.....	91
Anexo B.1 Conexiones eléctricas del transmisor Hydrotrac HT02	91
Anexo B.2 Especificaciones del Transmisor Rosemount 2051L	92
Anexo B.3 Bloques del controlador Smar CD600 Plus.....	94
Anexo B.4 Fotografías del proyecto	96

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama de proceso de producción de azúcar de caña.	2
Figura 1.2 Representación de un “Tacho” o tanque de evaporación al vacío.....	3
Figura 1.3 Diagrama de bloques general de la solución propuesta.....	6
Figura 3.1 Diagrama del Sistema de Doble Magma y Tres Templas.	14
Figura 3.2 Curva de zonas de cristalización de la sacarosa.....	16
Figura 3.3 Curva del proceso de cristalización.	18
Figura 3.4 Curva del proceso de desarrollo.....	19
Figura 3.5 Curva del proceso de masa de III.....	20
Figura 3.6 Sistema automatizado SMAR para tachos.	22
Figura 3.7 Sistema automatizado SIEMENS para tachos.	23
Figura 3.8 Curvas de Supersaturación de la sacarosa.....	24
Figura 3.9 Vista lateral de una calandria.	26
Figura 3.10 Molécula de agua, un dipolo eléctrico.	27
Figura 3.11 Molécula de agua, un dipolo eléctrico.	27
Figura 3.12 Medición de nivel por presión diferencial en un tanque presurizado.	29
Figura 3.13 Protocolo industrial HART.	30
Figura 3.14 Bloques de un sistema de control de lazo cerrado.	31
Figura 3.15 Diagrama de bloques de un regulador PID.	32
Figura 3.16 Diagrama de bloques de un PLC.....	34
Figura 3.17 Diagrama de la arquitectura Cliente/Servidor OPC.	35
Figura 3.18 Diagrama de la arquitectura de un Servidor OPC.	36
Figura 3.19 Diagrama de la arquitectura de un Cliente OPC.....	37
Figura 3.20 Representación de un Sistema SCADA.	39
Figura 5.1 Diagrama general del sistema.	45
Figura 5.2 Funcionamiento del SMAR DT301.	46
Figura 5.3 Funcionamiento del SMAR DT301.	47
Figura 5.4 Controlador SMAR LC700.....	48
Figura 5.5 Controlador SMAR CD600 Plus.	49
Figura 5.6 Transmisor Hydrotrac HT02.	51
Figura 5.7 Instalación del Transmisor Hydrotrac HT02.	51

Figura 5.8	Convertidor de RS485 a RS232 para el transmisor Hydrotrac HT02.	52
Figura 5.9	Transmisor EMERSON Rosemount 2051L.	53
Figura 5.10	Calibración de transmisor 2051L con configurador HART.....	53
Figura 5.11	Interconexión entre transmisores a regletas en panel de conexión.....	54
Figura 5.12	Conexión regletas del panel de transmisores hacia controladores.....	55
Figura 5.13	Módulo de conversión ENET-710.....	56
Figura 5.14	Implementación física del hardware.	57
Figura 5.15	Captura del programa Hydro-Com, pestaña de configuración de salidas.	58
Figura 5.16	Captura del programa Hydro-Com, pestaña de calibración.....	59
Figura 5.17	Captura del programa Hydro-Com, pantalla de monitoreo.	60
Figura 5.17	Captura del programa Conf600, escogencia de bloques.....	61
Figura 5.18	Captura del programa TagList600, servidor OPC.....	62
Figura 5.19	Captura del programa Indusoft, Cliente OPC.	63
Figura 5.20	Captura de la pantalla principal de monitoreo.	64
Figura 5.21	Captura de la pantalla de monitoreo del tachó 1.	65
Figura 5.22	Captura de la pantalla de monitoreo del tachó 6.	65
Figura 5.23	Captura de la pantalla de monitoreo del tachó 8.	66
Figura 5.24	Captura de la pantalla de monitoreo del tanque fundidor.	66
Figura 5.25	Captura de la pantalla de monitoreo y control del tachó 9.....	67
Figura 5.26	Diagrama de flujo del proceso de control del tachó #9.....	68
Figura 5.27	Control por bloques del tachó 9.....	69
Figura 5.28	Controlador PID Avanzado.....	70
Figura 6.1	Pruebas de precisión del transmisor de °Brix.....	72
Figura 6.2	Sonda del tachó para pruebas de concentración.	73
Figura 6.3	Gráfica de una masa cocida de tercera.....	75
Figura 6.4	Gráficas de masas de tercera manuales.	75
Figura 6.5	Representación del proceso de cocción de masa de tercera.	76
Figura 6.6	Pantalla para ingresar los parámetros de control.	77
Figura 6.9	Válvula mecánica para alimentar vapor.....	78
Figura 6.8	Control para la válvula de agua.....	78
Figura 6.9	Gráfica de una masa obtenida automáticamente.....	79

Figura 6.10 Gráfica de pruebas de calidad en las masas automáticas.	80
Figura 6.11 Gráfica de la masa automática #931.	81
Figura 6.12 Gráfica de la masa automática #979 con problemas de vapor.	82
Figura 6.13 Gráfica que muestra el tiempo de inactividad del tacho.	83
Figura B.4.1. Piso de tachos.	96
Figura B.4.2. Tacho #9 Automatizado.	96
Figura B.4.2. Válvulas Automáticas del Tacho #9.	97
Figura B.4.2. Implementación física de la solución.	97

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pureza y °Brix de las masas cocidas.....	25
Tabla 2. Parámetros de calibración de los transmisores de microondas.....	72

Capítulo 1: Introducción

Este capítulo tiene como objetivo describir de forma general los rasgos más significativos del problema planteado y a la vez, presentar la solución que se brinda a través del desarrollo del proyecto.

1.1 Problema existente e importancia de su solución

Azucarera El Viejo S.A. se encuentra ubicada en la localidad de La Guinea en el cantón de Carrillo Guanacaste, donde se procesa la caña de azúcar producida en sus 4,600 hectáreas y aquella que proviene de más de 500 agricultores de la cuenca del Río Tempisque. El subproducto biomásico de este proceso, llamado comúnmente bagazo, se utiliza como materia prima para producir energía eléctrica, aprovechando el potencial calórico del mismo.

La producción de azúcar es de 1.600.000 bultos de 50 Kg por año, en tres presentaciones: azúcar blanco de plantación, azúcar crudo y azúcar especial 150.

La producción de energía eléctrica es de 50 millones de kWh por zafra de los cuales 32 millones son para la venta.

Otros subproductos son la miel final que se utiliza para la fabricación de alcohol y alimentación de ganado, así como la cachaza y ceniza que se utilizan como fertilizantes.

Para obtener el azúcar final el ingenio cuenta con un proceso productivo certificado, donde la caña entra a la planta por las mesas de caña para ser lavada, luego se realiza el traslado por medio de conductores donde se utilizan cuchillas para cortar y desfibrar. Una vez que la caña es procesada se procede a extraer el jugo en los molinos, se realiza un proceso de desinfección y aclarado del jugo, posteriormente del jugo se obtiene una miel al ser evaporado llamada meladura.

Al salir del proceso de evaporadores se continúa al piso de tachos, que son evaporadores al vacío que cocinan las mieles y masas en los cuales se produce una cristalización inicial del grano de azúcar y se realiza un agrandamiento del grano.

Este proceso de cristalización y formación del grano final es empleado mediante el Sistema de Doble Magma y Tres Templas, en el que existen tachos de Primera, Segunda y Tercera que realizan un agotamiento de las mieles junto con cristalizadores y centrifugas para tal fin. Este sistema será descrito con mayor detalle en el capítulo 3, ya que debido a su complejidad merece explicarlo con detenimiento.

Al salir del sistema de Doble Magma se procede a secar el azúcar para luego ser empacada en sacas de 1000Kg, sacos de 50Kg o por contenedores dependiendo de la demanda del producto.

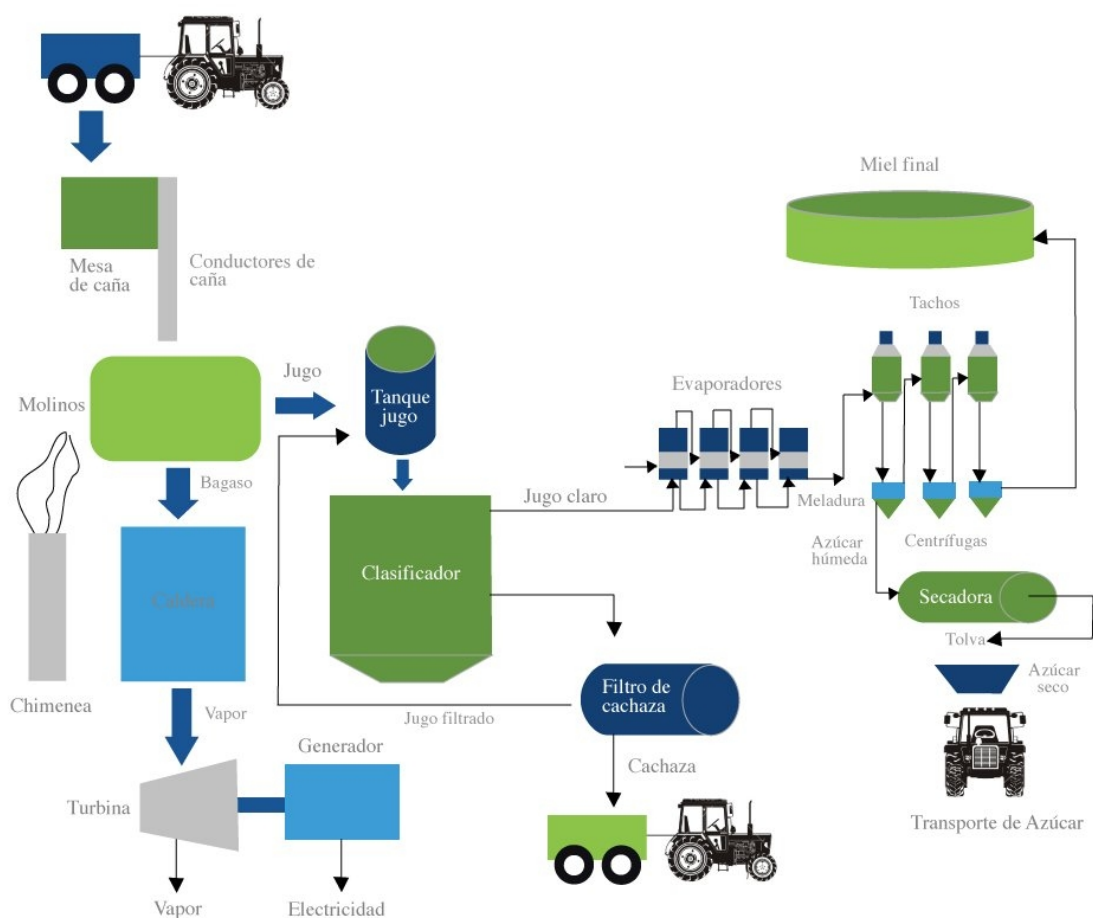


Figura 1.1 Diagrama de proceso de producción de azúcar de caña.
Fuente Azucarera El Viejo S.A. ^[1]

El proceso de producción del azúcar anteriormente descrito en la Azucarera El Viejo S.A., se encuentra automatizado en su mayoría, pero aún falta por realizar la etapa del piso de tachos, en la que se producen los cristales de azúcar, los cuales deben ser uniformes y con un tamaño constante para garantizar la calidad del producto final.

Estos tachos siempre han sido trabajados de forma manual por los operarios comúnmente llamados “tacheros”, los cuales han perfeccionado su propia receta con la cual manipulan las variables involucradas en el proceso para la obtención del producto final accionando válvulas manuales y observando constantemente la masa cocida mediante un refractómetro para presenciar la formación y el crecimiento de cristales.

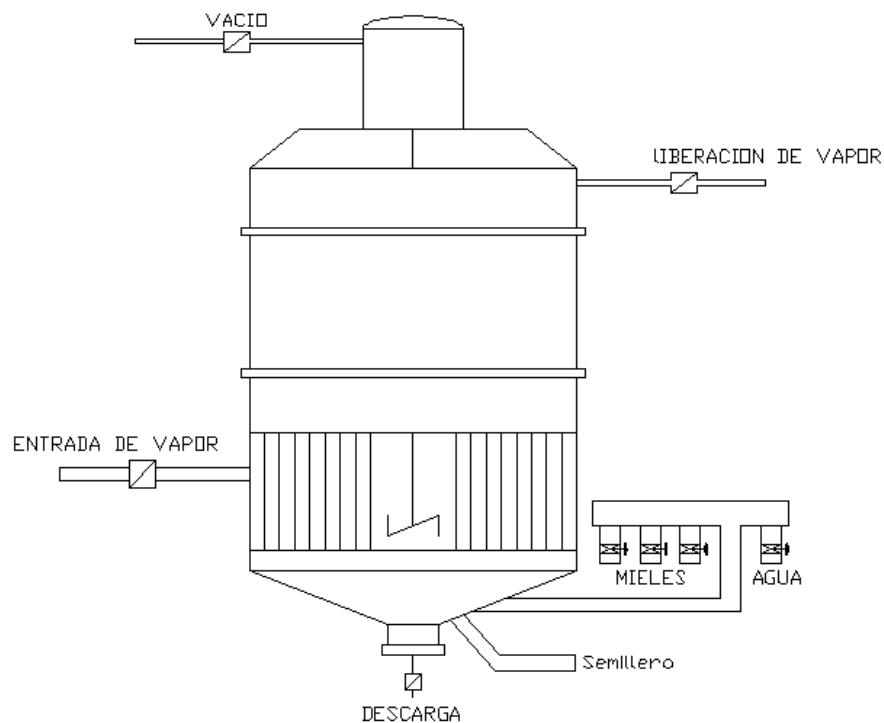


Figura 1.2 Representación de un “Tacho” o tanque de evaporación al vacío.

Debido a que un proceso manual siempre acarrea errores humanos, los cuales hacen que nunca haya una constancia en la obtención del producto final, y que además, en el piso de tachos es donde se debe garantizar la calidad del azúcar final, se determinó que el proyecto de graduación fuera desarrollado en la automatización de uno de estos tachos para lograr una estandarización en el proceso, que permita

obtener un mejor agotamiento de las mieles y una mejor calidad en uniformidad y tamaño del grano.

Los tacheros al ejecutar sus labores de cocción de las mieles en los tachos, para obtener los cristales del azúcar, no contaban con ninguna herramienta tecnológica que les facilitara su trabajo, por lo que empleaban técnicas empíricas como la observación del grano por medio de la lente de un periscopio, probar la consistencia y elasticidad de la masa utilizando los dedos de la mano y calculando el nivel del tacho por medio de unos visores de vidrio.

Por consiguiente, la automatización y monitorización de tachos trae beneficios no solo en el ámbito productivo sino que también a la hora de facilitar el trabajo de los operarios garantizándoles un mejor ambiente laboral con menos carga física.

Estos beneficios pueden ser citados textualmente:

- a-** Disminución de la pureza de mieles finales obteniendo mayor azúcar.
- b-** Mejoramiento de calidad de los granos en uniformidad, tamaño y color.
- c-** Mejoramiento de la eficiencia del tacho reflejado en disminución de tiempos de cocción.
- d-** Se garantiza un proceso estándar y repetitivo en la operación del tacho.
- e-** Disminución de la carga física de los trabajadores al poder contar con equipo tecnológico que elimine supuestos y falsas expectativas del estado real del proceso.

1.2 Solución seleccionada

En la Azucarera el Viejo S.A. se utilizan 9 tachos, los tachos #1, #2, #3, #4 y #5 son de Primera; los tachos #6 y #7 son de Segunda; y los tachos #8 y #9 de Tercera.

Debido a la complejidad y al alto costo de un proceso de automatización, se escogieron los tachos #1, #2, #6, #8, #9 y el tanque fundidor de magma para ser

monitoreados y solamente el tacho #9 y el tanque fundidor se controlaron de forma automática.

El Proyecto del Piso de Tachos se dividió en las siguientes etapas:

I Etapa: Medición confiable y segura del °Brix, Temperatura del material y el nivel de los tacho #1, #6, #8, #9 y el tanque fundidor, mediante la correcta calibración de los transmisores contra pruebas de laboratorio.

II Etapa: Utilización de las variables medidas para monitorear la cocción de las masas en los tachos mediante pantallas de visualización en tiempo real, con lo cual se brinda una ayuda visual clara y confiable del estado del proceso de producción de los tachos mencionados en la I Etapa, además de adicionar el tacho #2 al monitoreo.

III Etapa: Automatización del proceso de cocción en el tacho #9 de acuerdo a la receta empleada por el tachero. Esto se implementó mediante el accionamiento de válvulas neumáticas del semillero, miel y agua, con base en las mediciones obtenidas de °Brix y Nivel de acuerdo a la receta analizada del tacho #9. Además, también se garantizó un funcionamiento constante del tanque fundidor de magma proporcionado por un lazo de control que actúa directamente sobre la entrada de agua del tanque.

La implementación del sistema de control y monitoreo se basa en siguientes especificaciones:

- a-** Medición de °Brix por sensores de microondas.
- b-** Calibración de los transmisores de °Brix contra laboratorio.
- c-** Medición de Temperatura por termopar.
- d-** Utilización de transmisor para medir nivel por medio de presión diferencial.
- e-** Utilización de protocolo de comunicación analógico HART para los transmisores.
- f-** Empleo de controladores digitales para realizar la lectura analógica de las señales.
- g-** Utilización de una interfaz Ethernet para comunicar los controladores con una computadora de escritorio.

- h- Utilización de un programa de automatización con servidor OPC para monitorear y controlar el proceso del controlador desde la computadora por medio de una interfaz grafica.
- i- Accionamiento de válvulas neumáticas con actuadores y posicionadores analógicos.
- j- Obtención de graficas del proceso para observar el comportamiento de las variables.

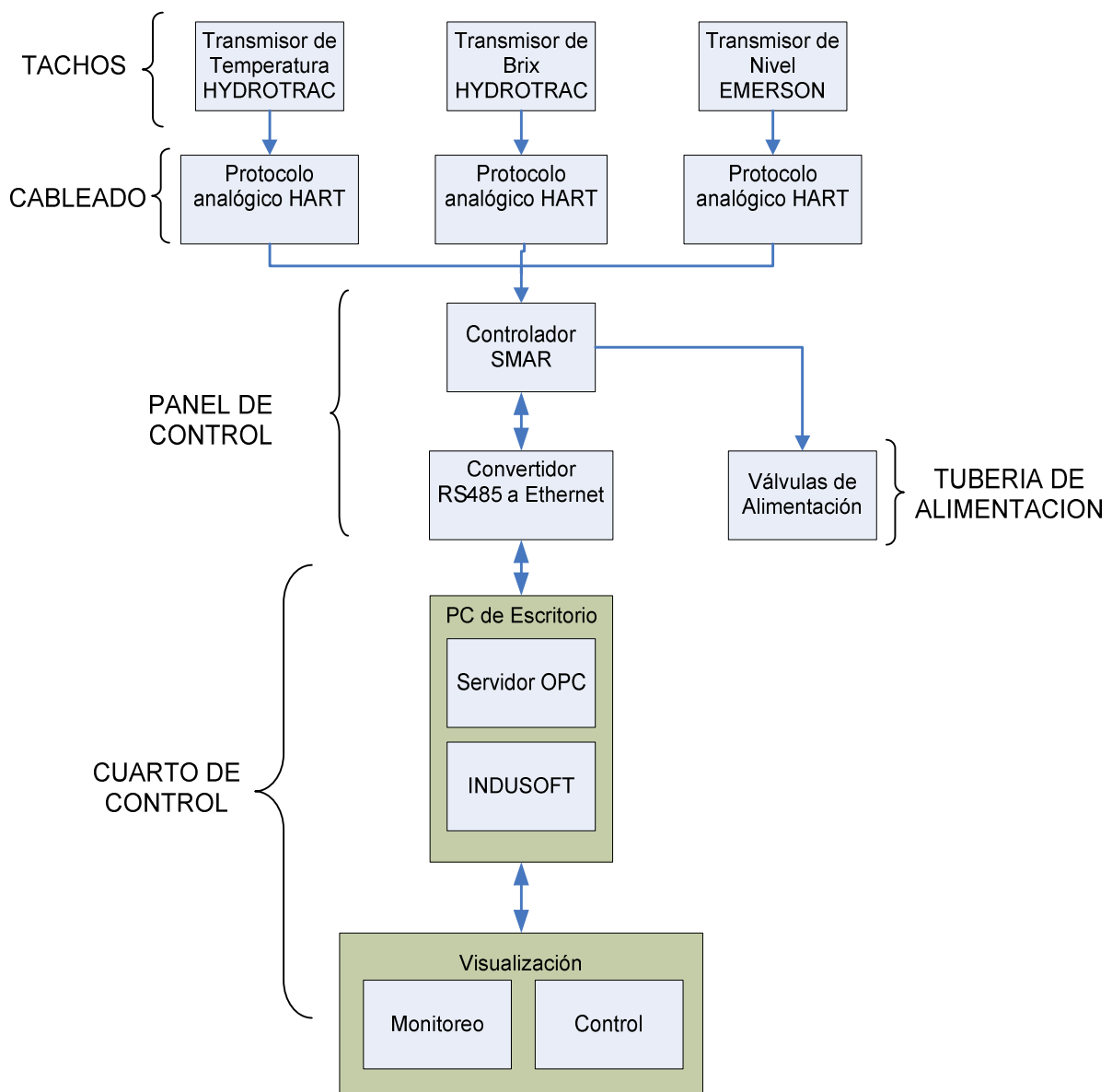


Figura 1.3 Diagrama de bloques general de la solución propuesta.

Capítulo 2: Meta y objetivos

Este capítulo hace mención a los aspectos principales del proyecto, expresa el alcance al que se pretende llegar y de qué forma se debe llegar.

2.1 Meta

Obtener una mejor calidad y uniformidad en el grano del azúcar producido en los tachos, mediante un proceso estandarizado, con el cual se logre monitorear, controlar y manipular variables involucradas que permiten tener una formación de cristales altamente enriquecidos con sacarosa, un mayor agotamiento de las mieles y una disminución en la pureza de la miel final de forma automática.

2.2 Objetivo general

Diseñar un sistema de monitorización y control para la automatización del proceso de cristalización del azúcar presente en el piso de tachos de cocción al vacío.

2.3 Objetivos específicos

2.3.1 Objetivos de hardware

1. Determinar los transmisores de °Brix que mejor se ajusten a las características de operación de los tachos por medio del tipo de tecnología aplicada a la medición de sólidos disueltos en las mieles.
2. Determinar los transmisores de nivel que puedan ser utilizados en tanques de operación al vacío.
3. Utilizar actuadores neumáticos con posicionadores analógicos para la manipulación de las válvulas de alimentación de mieles.

4. Emplear un controlador digital programable que sea compatible con el protocolo de comunicación utilizado por los transmisores.
5. Realizar una monitorización de los datos del proceso automático mediante el uso de una computadora de escritorio conectada al controlador digital.

2.3.2 Objetivos de software

1. Calibrar los transmisores mediante el uso del software propietario creado por el fabricante.
2. Diseñar una rutina de control en los controladores digitales para la lectura y manipulación de las señales involucradas.
3. Configurar el registro de variables de comunicación entre el controlador y la computadora mediante el uso de un Servidor OPC.
4. Diseñar una interfaz grafica para monitorear el proceso que tenga un aspecto real al del lugar de operación de los tachos.
5. Desarrollar las pantallas graficas que permitan modificar e ingresar los parámetros característicos de la rutina de control.
6. Elaborar un registro grafico de las variables del proceso para el análisis de calidad del producto final.

2.3.3 Objetivos de documentación

1. Realizar un estudio sobre el sistema de doble magma y tres templeas utilizado en la obtención de azúcar en los tachos.

2.3.4 Objetivos de implementación

1. Realizar la instalación de los transmisores de °Brix y Nivel en los tachos.
2. Realizar el montaje del gabinete para el panel de conexiones eléctricas del hardware.
3. Diseñar las conexiones eléctricas de los transmisores hacia las regletas del panel de control.

4. Ejecutar la interconexión de las señales de los transmisores hacia los controladores por medio de regletas.
5. Realizar la conexión neumática y eléctrica de las válvulas de alimentación.
6. Emplear una interfaz de hardware Ethernet para conectar los controladores a la computadora de escritorio.
7. Construir una Caseta en el piso de tachos que sirva como cuarto de control y monitoreo.
8. Instalar medios físicos para facilitar la visualización del estado del proceso de los tachos.

Capítulo 3: Marco Teórico

Este capítulo muestra la teoría de los principales temas o conceptos relacionados con el problema y con la solución planteada.

3.1 Descripción del Proceso a mejorar

La realización de este proyecto se llevó a cabo en una planta azucarera por lo que se debe conocer primeramente el proceso productivo involucrado, para lograr entender de qué se trata, esto debido a que el proyecto es multidisciplinario y no solamente involucra el conocimiento en electrónica y control automático, sino que es necesario involucrarse con el proceso a fondo, para lograr obtener los mejores resultados.

3.1.1 Proceso industrial de obtención del azúcar de caña ^[1]

El proceso productivo de planta del azúcar de caña en la Azucarera El Viejo se divide en las siguientes etapas:

- a. **Patio de caña:** La caña de azúcar llega al ingenio en canastas remolcadas por cabezales o tractores, las cuales son pesadas en básculas electrónicas y se realiza un muestreo por medio de una sonda mecánica, con la finalidad de determinar sus características de calidad, como el nivel de pureza, °Brix (contenido de sólidos disueltos en líquido), fibra y nivel de impurezas, para luego ser dispuestas a las Mesas de Caña por medio de un sistema de grúas donde se realiza un lavado de las impurezas que trae consigo.
- b. **Picadoras de caña:** Luego de realizarse un lavado en las Mesas de Caña se transporta el material por medio de conductores mecánicos, automatizados con sensores de ultrasonido hacia las picadoras, las cuales son accionadas por turbinas de vapor, provistas de cuchillas que giran a gran velocidad, donde se

busca fraccionar la caña para abrir las celdas lo cual facilita la extracción del jugo que contiene.

- c. Molinos:** Los molinos procesan 290 toneladas de caña por hora, para esto se cuenta con un tándem de 5 molinos movidos por motores eléctricos de alta potencia accionados con variadores de frecuencia, con mazas ranuradas de 78" de largo x 44" de diámetro, en medio de los cuales se hace pasar el colchón de caña y mediante presión se extrae el jugo de caña, el cual se recolecta en canoas y tanques. En este proceso de maceración se agrega agua y jugo recirculado de los molinos con la finalidad de aumentar la extracción de la sacarosa presente en el material fibroso. Este material fibroso sin jugo se conoce como bagazo, el cual tiene alto poder calorífico y sirve como combustible para las calderas donde se obtiene vapor para alimentar 4 turbogeneradores, que producen la energía eléctrica necesaria para la producción del ingenio y para la venta al Sistema Nacional Eléctrico.
- d. Sulfatación y Alcalizado:** El jugo diluido extraído de los molinos tiene un pH alrededor de 5.4 y es sulfitado en torres de absorción que son equipos que trabajan en contracorriente, ingresando el jugo diluido por la parte superior y alimentando anhídrido sulfuroso por la parte inferior. Al entrar en contacto el anhídrido con el jugo se produce la desinfección, destruyéndose los agentes patógenos, bacterias y microbios que pudiesen estar presentes en el jugo, por lo que el pH del jugo sulfitado cambia a alrededor de 4.8; simultáneamente la sulfitación reduce las sales férricas (color pardo) presentes a sales ferrosas (color rojo claro) con lo que se realiza una acción de blanqueo del jugo. Debido al incremento de la acidez del jugo, se puede producir una reacción de inversión de la sacarosa por lo que es imprescindible proceder inmediatamente a neutralizar el jugo hasta obtener un pH entre 6.8 y 7.5 agregando una lechada de cal al jugo alcalizado procediendo luego al proceso de floculación que permite la separación de los sólidos que han entrado a la caña.

- e. Clarificación del jugo:** El jugo alcalizado se calienta con vapor y se dispone en tanques clarificadores, donde se realiza la separación de sólidos e impurezas por sedimentación, además de agregar floculante para agrupar en forma de flóculos las impurezas solidas presentes que tienden a sedimentar por ser más pesadas que el jugo, dejando en la parte superior del clarificador un jugo limpio y brillante y en la parte inferior la cachaza, la cual es filtrada en filtros rotativos al vacío para recuperar nuevamente el jugo que contiene para realimentar el clarificador.
- f. Evaporación:** El jugo clarificado se recibe en los tanques evaporadores para eliminar gran parte del agua presente en el jugo el cual tiene alrededor de 82% - 87% de agua (13 – 18 °Brix) y se evapora hasta lograr una concentración de alrededor de **62 °Brix** que se denomina **Meladura** la cual es sometida a una nueva clarificación para eliminar espuma que contiene los sólidos no azúcares para luego ser enviada a tanques de alimentación de los **Tachos**, que son evaporadores de simple efecto que trabajan al vacío, para concentrar y lograr la cristalización de la sacarosa.
- g. Cristalización:** Para lograr la formación de los cristales de azúcar se requiere eliminar el agua presente en la meladura, esto se realiza durante la cocción de las templeas en equipos llamados Tachos. Se le llama templeas a las masas que se cocinan en los tachos, en un sistema de tres templeas se producen tres tipos de masas cocidas: las "de primera", las "de segunda" y las "de tercera".
- h. Centrifugación:** Los cristales se separan del licor madre mediante fuerza centrífuga en tambores rotatorios que contienen mallas en su interior. Durante el proceso de centrifugado, el azúcar se lava con agua caliente para eliminar la película de miel que recubre los cristales y por medio de conductores y elevadores para conducirla a la secadora. La miel que sale de las centrífugas se bombea a tanques de almacenamiento de mieles de los tachos para posteriores cocimientos en los mismos. De la masa tercera se obtiene una miel agotada o miel de purga que se retira del proceso y se comercializa para alimentación de

ganado y/o como materia prima para la producción de alcoholes. A esta miel se le llama Miel Final o Melaza.

- i. **Secado:** El azúcar húmeda que sale de las centrífugas se transporta por elevadores y bandas para alimentar la secadora, que consiste en un tambor rotatorio inclinado, en el cual el azúcar se coloca en contacto con aire caliente que entra en contracorriente. El aire se calienta con vapor en intercambiadores tipo radiador y se introduce a la secadora con ventilador de tiro inducido. El azúcar seco sale por el extremo opuesto de la secadora, donde se instala una malla clasificadora para remover los terrones de azúcar. El azúcar seco se empaca en sacos de 50 kg o de 1000 Kg y se despacha a las Bodegas de LAICA.

3.1.2 Sistema de Doble Magma y Tres Templas ^[9]

El sistema de Doble Magma se basa en producir un cristal de azúcar mediante un método de semillamiento, luego enriquecer este grano pasando por un proceso de agotamiento de mieles para que el cristal pueda absorber la mayor cantidad de sacarosa posible, con lo cual se enriquece su pureza mientras que en las mieles se reduce.

La base de este sistema consiste en la elaboración de 3 templas o masas, 3 mieles y 3 magmas.

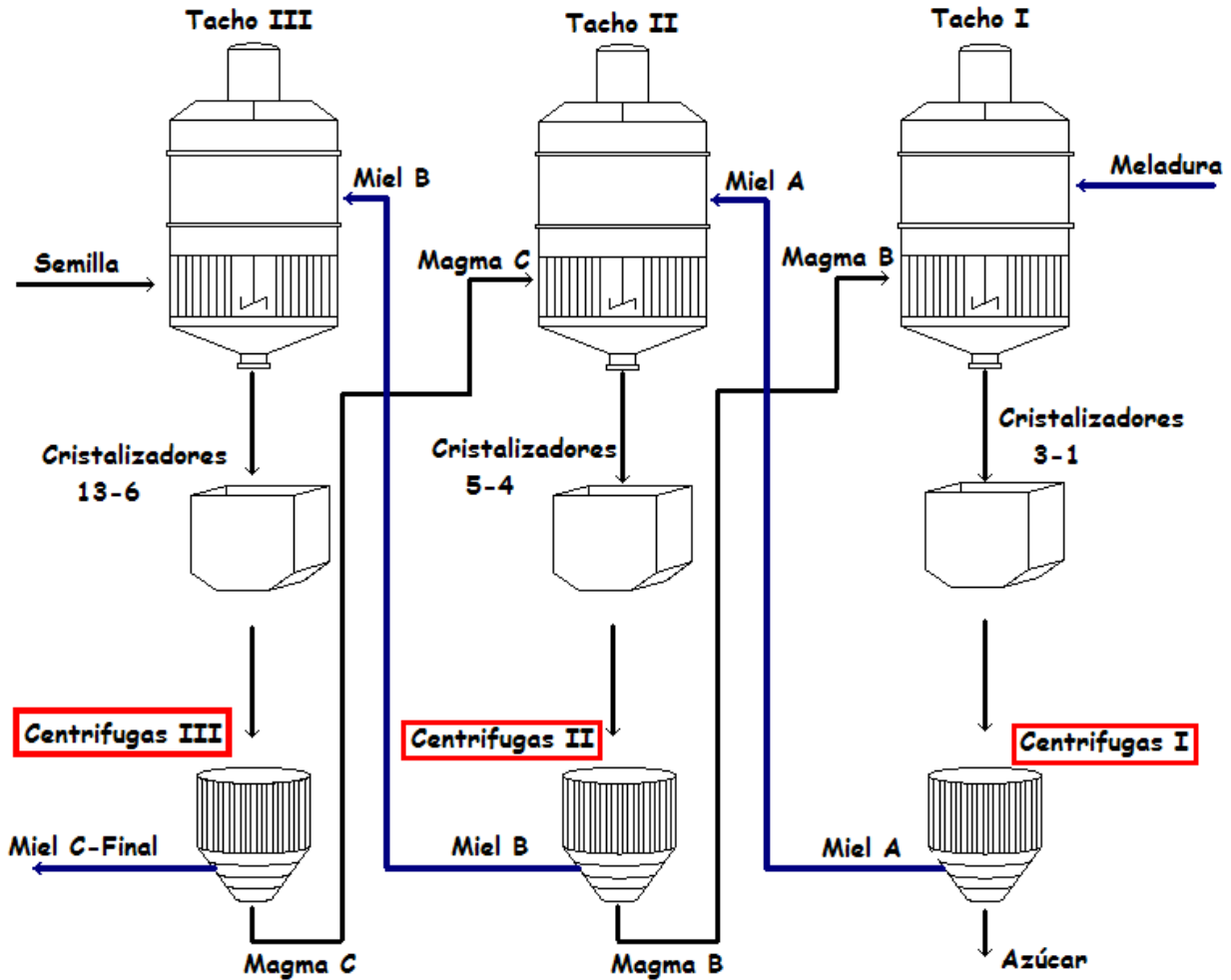


Figura 3.1 Diagrama del Sistema de Doble Magma y Tres Templas.

Como se puede observar en la figura 3.1, el sistema es muy complejo ya que busca aprovechar de la mejor manera la sacarosa, de forma que se dé un agotamiento de las mieles mientras que el cristal gana tamaño hasta que se produce un grano apto para su comercialización.

Las “**Templas de I**” son las de azúcar comercial y las otras son materiales para procesos internos que permiten obtener finalmente el azúcar comercial.

Para obtener la “**Masa III**” se alimenta una cierta cantidad de semilla (33% del volumen del tacho) de una determinada granulometría al “**Tacho de III**”, luego se

alimenta **“miel II”** y se somete a evaporación, alimentándose continuamente **“miel II”** hasta completar el volumen del tacho y se concentra hasta 96 ~ 98 °Brix.

Al llegar a esta concentración se descarga la templa o masa cocida (que es una mezcla de miel y cristales de sacarosa) hacia los cristalizadores para terminar el proceso de “agotamiento” de las mieles. Para lograr la separación de los cristales presentes en la templa se emplean las **“Centrífugas de III”**, equipos que permiten separar la miel de los cristales presentes en las templeas. Los cristales separados son llamados **“Azúcar de III”** y la miel separada **“miel III, miel final o melaza”**.

Al azúcar de III se adiciona agua acompañada de agitación hasta formar una masa, este material recibe el nombre de **“Magma C”** y es utilizado como **“semilla”** para la preparación de **“Templas de II”**.

Para obtener las **Templas de II** se alimenta una cierta cantidad de Magma C al **“Tacho de II”**, luego se alimenta **“miel I”** y se somete a evaporación, hasta que la masa elaborada contenga aproximadamente 93 ~ 94 °Brix. Al llegar a esta concentración se descarga la templa o masa cocida hacia los cristalizadores para terminar de agotar las mieles.

Para lograr la separación de los cristales de las mieles se emplean las **“Centrífugas de II”**. Los cristales separados son llamados **“azúcar de II”** y la miel separada **“miel II”**. El **“azúcar de II”** es mezclado con una pequeña cantidad de agua para elaborar una masa llamada **“Magma B”**, la cual es bombeada al piso de tachos para ser empleada como **“semilla”** en la elaboración de las **“Templas de I”**. Si hay exceso de Magma B se procede a disolver el azúcar de segunda para obtener una **“Magma Fundida”**, la cual es bombeada a los Tachos de I.

Para elaborar las **“Templas de I”** se alimenta al tacho cierta cantidad de **“Magma B”** como semilla, luego se agrega meladura y se concentra la masa hasta obtener 91 ~ 92 °Brix. Al llegar a esta concentración se descarga la templa o masa cocida hacia los cristalizadores para darle agitación a las templeas e impedir que se endurezcan demasiado. Para lograr la separación de los cristales presentes en la templa se emplean **“Centrífugas de I”**.

Los cristales separados son denominados "**azúcar de I**" o "**Magma A**", que es el azúcar comercial, y la miel separada es llamada "**miel I**".

3.1.3 Proceso de Cristalización del azúcar

Para lograr obtener cristales de azúcar de la mezcla de mieles de la caña se debe llegar a una zona sobresaturada, para lo cual existen 3 técnicas para cristalizar pero no todas pueden ser utilizadas en el ámbito industrial debido a la cantidad de recursos y tiempo que consumirían.

La cristalización es una operación de transferencia de materia en la que se produce la formación de un sólido (cristal) a partir de una fase homogénea (soluto en disolución o en un fundido).

Controlando las condiciones del proceso se obtiene un producto sólido constituido por partículas discretas de tamaño y forma uniforme, que es lo que se pretende lograr con la cristalización del azúcar en los tachos.

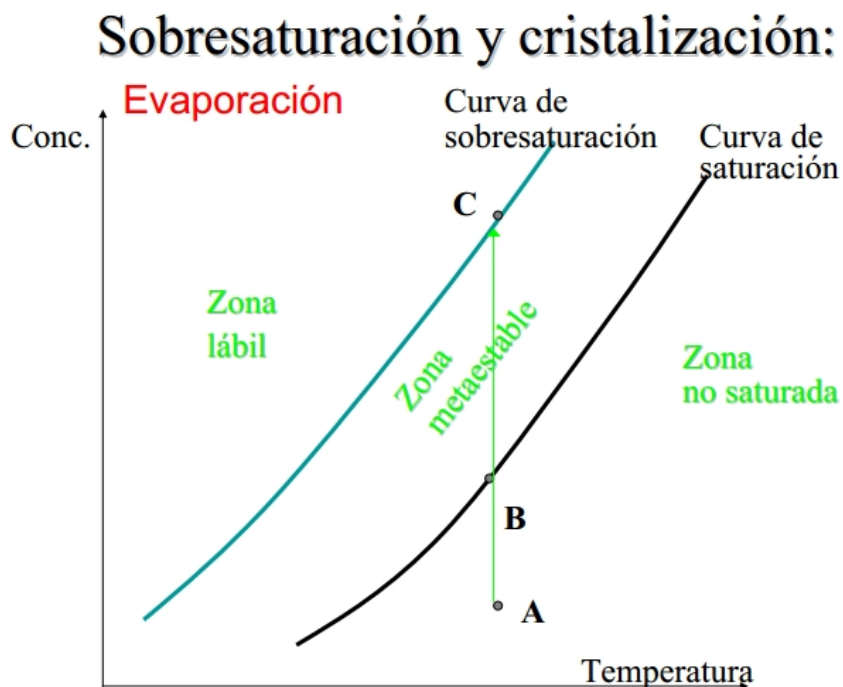


Figura 3.2 Curva de zonas de cristalización de la sacarosa.
Fuente: Proceso de Cristalización ^[3]

De la figura anterior se observan 3 zonas detalladas a continuación.

- a-** Zona no saturada: Esta es una zona estable en la que hay subsaturación, donde no es posible la cristalización.
- b-** Zona Metaestable: es una zona sobresaturada donde la cristalización espontánea es improbable y la cristalización se puede dar de forma controlada.
- c-** Zona inestable o zona sobresaturada: en este punto la disolución está tan saturada que se puede dar una cristalización espontánea produciéndose granos falsos que afectan la uniformidad de la granulometría.

En la cristalización existen 3 etapas las cuales son sobresaturar, formar núcleos y el crecimiento del cristal.

Para sobresaturar en los tachos se trabaja en la zona metaestable concentrando las masas por medio de evaporación, luego se procede a formar núcleos mediante el método de semillamiento o siembra de cristales, este proceso de nucleación secundaria consiste en preparar una mezcla de azúcar pulverizada disuelta en alcohol isopropílico como semilla, con la forma y tamaño deseado para la formación de los cristales, para posteriormente hacer crecer el grano en el proceso de desarrollo y formación de masas.

En un tacho se prepara una base para cristalizar, que es una mezcla entre meladura y miel I altamente pura, que representa el 33% del volumen del tacho llamado comúnmente “pie de carga”, esta base de alrededor de 72 °Brix se evapora para concentrarla hasta un 80 ~ 83 °Brix y cuando está en el punto óptimo de semillamiento, que es en la zona metaestable, se procede a agregar la semilla, dando unos 15 minutos de tiempo manteniendo el °Brix constante mediante la adición de agua para que la mezcla cristalice y adquiera la forma y tamaño del cristal semilla, este proceso se puede ver en la figura 3.3.

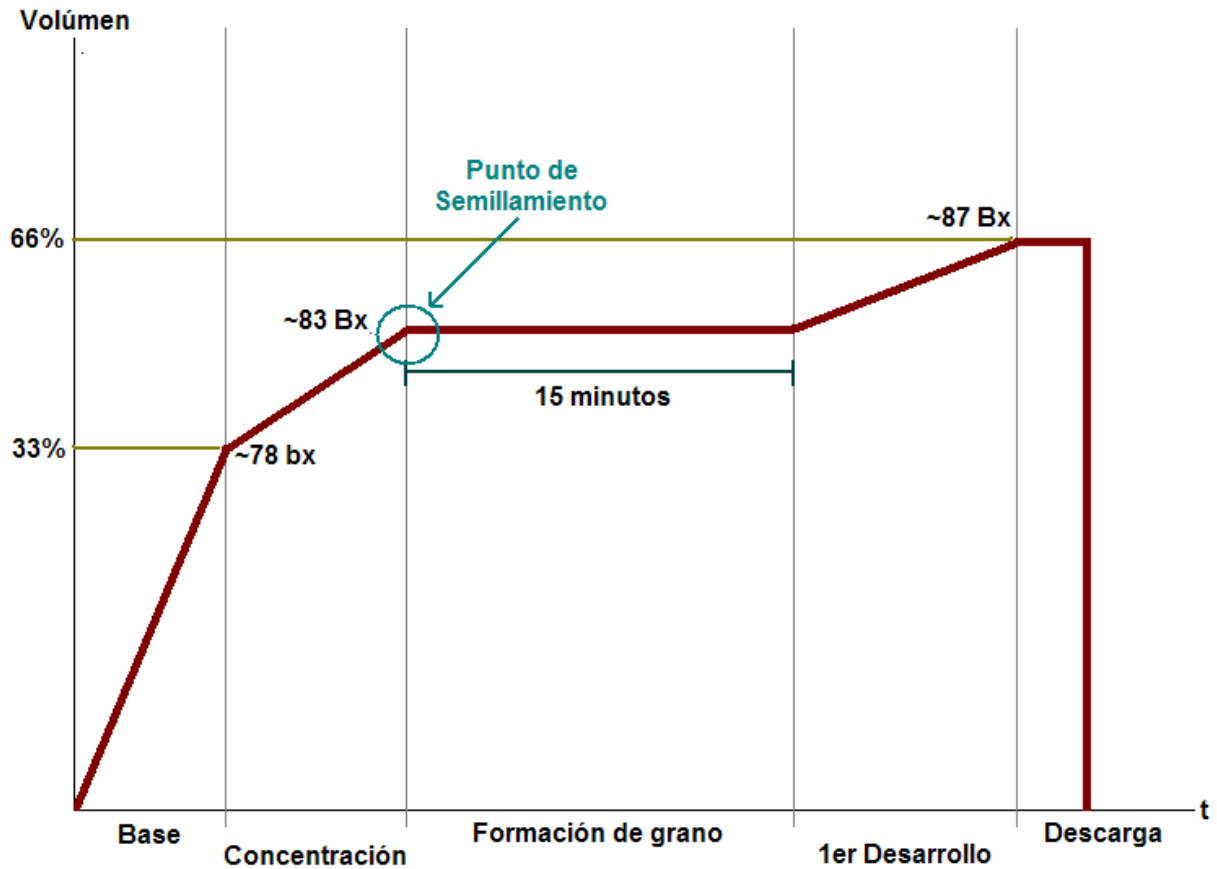


Figura 3.3 Curva del proceso de cristalización.

Luego de pasados esos 15 minutos se ha creado una masa cristalizada a la cual se le agrega Miel B para completar un nivel de llenado del 66% del tacho mientras se concentra la masa hasta 87°Bx con lo cual se descarga un tercio de la masa produciendo un corte, el cual es depositado en los semilleros para tal fin.

Al haber cristalizado y contar con el grano microscópico, se procede al **desarrollo** del grano, esto se logra llevando ese 33% del nivel de la cristalizada hasta un 100% del volumen del tacho adicionando miel II pero manteniendo constante el °Brix en 87, expresado en la figura 3.4.

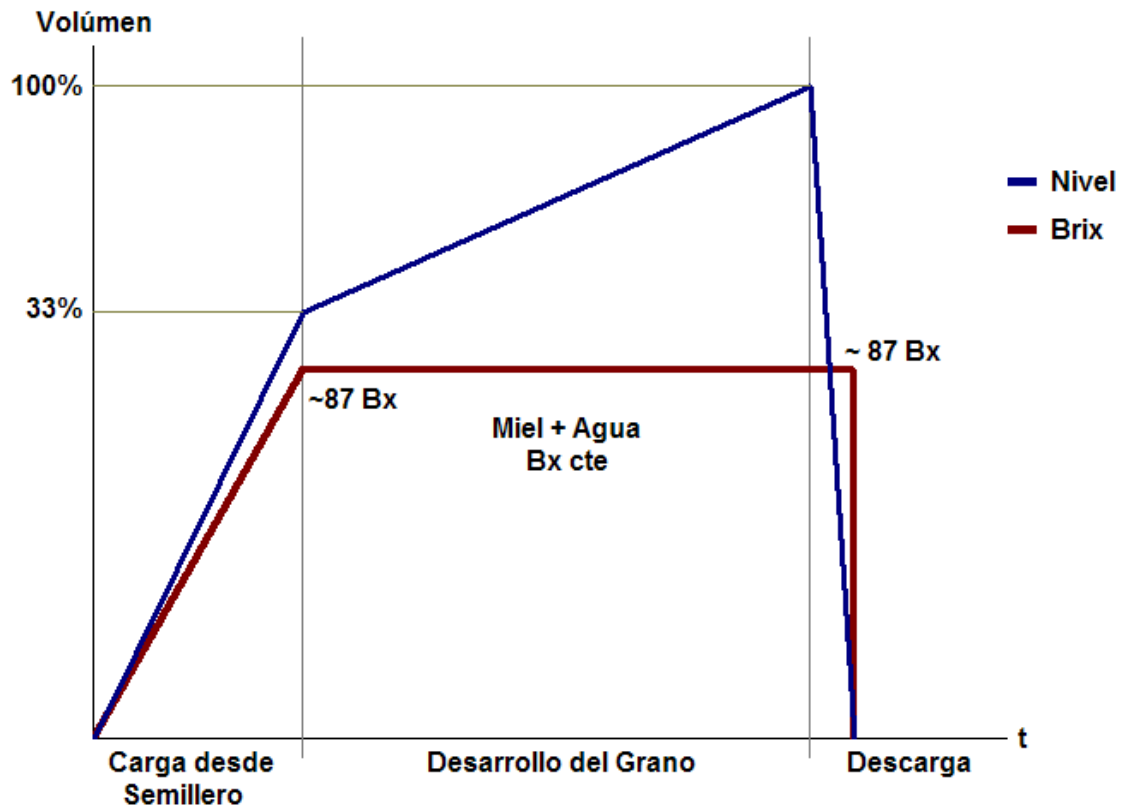


Figura 3.4 Curva del proceso de desarrollo.

Nuevamente con este desarrollo se realiza 1 corte de 66% en un semillero y se deja el 33% restante en el tacho para producir una **masa**, que esta consiste en hacer crecer ese grano adicionando miel II y llevando la mezcla hasta una concentración de entre 96 y 98 °Brix para producir una masa de III, ilustrado en la figura 3.5.

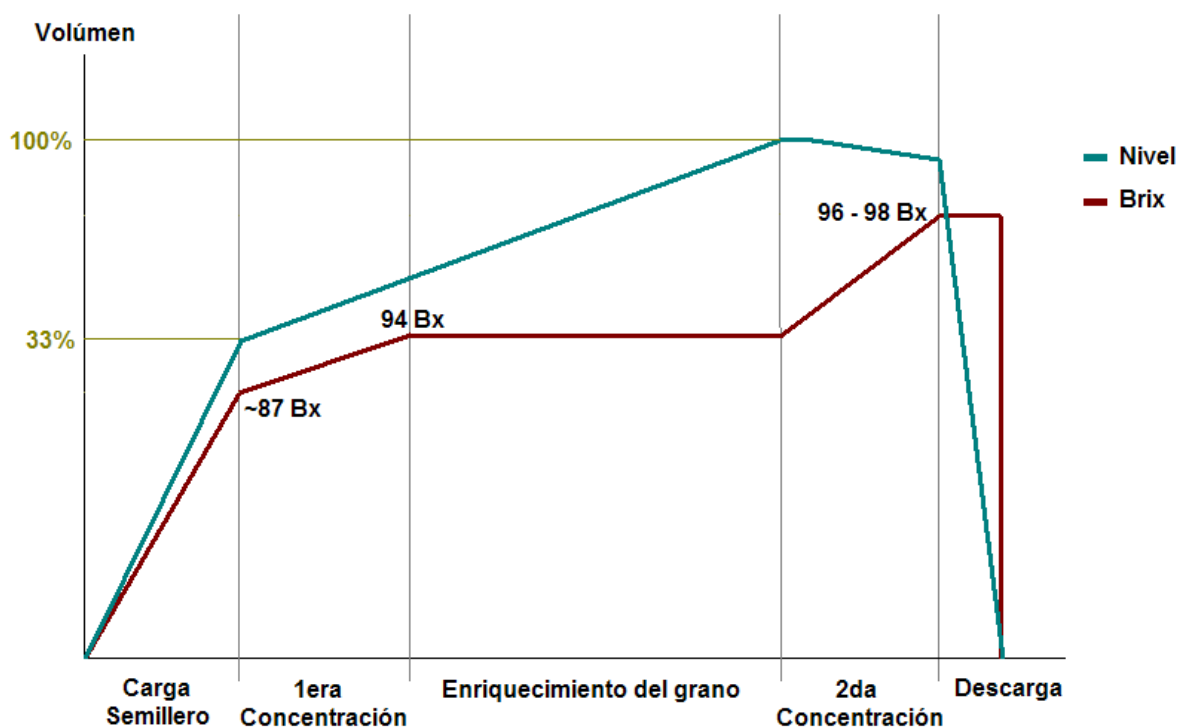


Figura 3.5 Curva del proceso de masa de III.

De los procesos anteriormente mencionados, el proceso de masa de III es el que toma más tiempo en realizarse, esto es debido a que el tacho debe llenarse a un 100% de su capacidad y por consiguiente es más difícil lograr la concentración deseada, por lo que el proceso llega a tardar hasta 8 horas para lograr un °Brix de alrededor de 98 para la descarga final.

Por ese motivo mediante la realización de este proyecto con la implementación de equipo electrónico se pretenden mejorar los tiempos de cocción y el enriquecimiento del grano de azúcar haciendo que las masas tengan cristales más uniformes y que se logre un mejor agotamiento de las mieles.

3.2 Antecedentes Bibliográficos

En el caso de la automatización de tachos de cocción al vacío, se han implementado diversos sistemas a lo largo del tiempo, todos estos sistemas han sido desarrollados por ingenieros que han tenido que observar el proceso, comprenderlo, aprenderlo y sobre todo analizarlo, esto debido a que todos los ingenios azucareros emplean técnicas propias para la producción del grano de azúcar por lo que el proceso de automatización no puede ser general para todos los ingenios existentes.

Es por eso que muchos de los instrumentos y dispositivos utilizados varían dependiendo del criterio del personal encargado del proceso productivo y de automatización.

Para la medición de la consistencia de las soluciones de azúcar se han implementado muchos métodos a través de los años. Estos métodos incluyen señales eléctricas como la medición de conductividad de las masas cocidas, técnicas refractométricas, nucleónicas, de viscosidad y medición de la elevación del punto de ebullición.

El método más usado fue el de conductividad eléctrica y se remonta desde los años de 1930. Luego en los años finales de los setenta se empezó a experimentar con dispositivos de ondas de radio.

Estos dispositivos con microondas llegaron a convertirse en los más utilizados en la actualidad debido a la gran exactitud de la medición.

Además de los dispositivos electrónicos para la medición del °Brix, también se han utilizado transmisores de nivel por radar de no contacto, por radar de onda guiada, transmisores ultrasónicos, de capacitancia, desplazadores, nucleares y transmisores de presión.

Utilizando algunos de los transmisores antes mencionados, se han realizado trabajos de automatización en tachos, todos en condiciones ambientales y de operación diferentes, por lo que no se tiene un estándar a seguir.

The screenshot displays the main control screen for the COZEDOR 1 system. At the top, there are navigation tabs for OVER VIEW, FACE PLATE, RT TREND, GRAPH, DETAIL, CHANGE, CON 1, CON 2, CON 3, ALARM LIST, ACK, PREV, MAIN, and a date/time display showing 21/9/98 at 09:19:25.

USINA MARACÁ S.A. AÇ. ALCOOL smar

COZEDOR 1

CHAVE MC CAMPO

- COZ_2
- COZ_3
- L23
- MEIS
- CENT
- GRUPO
- CORTE
- VALV
- FECHA

SEQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

- CRISTALIZAÇÃO
- SEMEADURA
- PROGRAMAÇÃO

CICLOS: [STOP] [START]

STATUS DE ALARMS

[Red Icon]	50.00	N. ESPELHO (N1)
[Red Icon]	50.00	N. FINAL (NF)
[Red Icon]	50.00	N. P/VAPOR (NV)
[Red Icon]	50.00	N. ZERO (NZ)
[Red Icon]	50.00	N. LAVAGEM (NL)
[Green Icon]	-15.00	P. INICIAL (P0)
[Green Icon]	-15.00	P. TRABALHO (P1)
[Green Icon]	-15.00	P. QUEBRA VÁCUO (P2)
[Green Icon]	-15.00	P. INICAL LAVAGEM(P3)
[Green Icon]	50.00	P. SEMENTE 1 (PS1)
[Green Icon]	50.00	P. SEMENTE 2 (PS2)
[Green Icon]	50.00	CONC. CHOQUE (CC)
[Green Icon]	50.00	CONC. FINAL (CF)
[Green Icon]	325.00	T. LIMPEZA (TL)
[Green Icon]		NÍVEL ALTO SEMENTEIRA
[Green Icon]		FALTA SEMENTE
[Green Icon]		MT. TQ. SEMENTE PARADO

Process Flow Diagram:

- TANQUE DE SEMENTE:** Connected to the central tank via a pipe labeled "DESC. TQ. SEMENTE".
- ÁGUA LIMPEZA:** Input from the left, passing through a filter and valve.
- DRENO:** Drainage point below the water input.
- PT-513:** Pressure Transmitter showing 0.75.
- TT-515:** Temperature Transmitter showing 325.00.
- LIQUIDAÇÃO COL. ÁGUA:** Liquidation column output.
- COL. MASSA:** Mass column output.
- SEMENTEIRA:** Seed bed at the bottom, with a discharge point labeled "DESCARGA DE MASSA".
- SPN -15.00 / SP SEM. -15.00:** Setpoint indicators.
- V.LIMPEZA:** Vacuum level indicator.
- COLLETOR GERAL:** General collector for liquid.
- ÁGUA:** Water supply lines throughout the system.
- PROD. AÇ.:** Sugar production output.
- MEL IF-512:** Honey flow indicator showing 50.00.
- ÁGUA IF-512:** Water flow indicator showing 50.00.
- LT-511:** Level Transmitter showing 50.00.
- XS LIN:** Signal line indicator.
- PI_SEME - VALV.FPLATEP:** Seed inlet valve control.
- ABRE / FECHA:** Open/Close buttons for the seed inlet valve.

Fuente: SMAR Sugar Boiling ^[20]

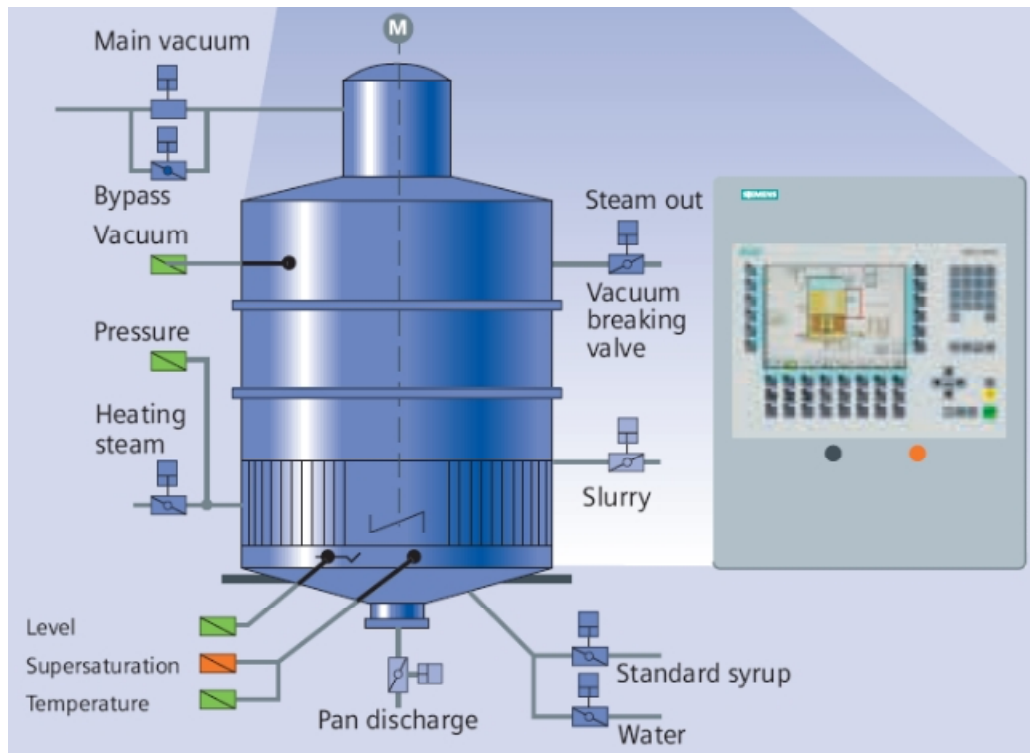


Figura 3.7 Sistema automatizado SIEMENS para tachos.
Fuente: SIEMENS NAHMAT ^[14]

3.3 Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema.

3.3.1 Supersaturación y °Brix ^[7]

La solubilidad del azúcar en agua varía con la temperatura y con la pureza de la solución, dependiendo de la variación de los no-azúcares. Una solución de azúcar en agua puede ser concentrada más allá del nivel de saturación, por evaporación del agua asociada, después de lo cual el azúcar comenzará a cristalizarse.

La supersaturación es la relación entre la concentración de la masa de sacarosa e impurezas en agua entre la concentración de la sacarosa pura en agua como se expresa en la ecuación 1.

$$SS = \frac{q_{sat,i}}{q_{sat,p}} \quad (3.1)$$

El Grado Brix o °Bx es una medida de densidad, es una aproximación a la cantidad de sacarosa disuelta en una solución acuosa, debido a que en una miel o masa no solo está presente el azúcar puro sino que también están presentes otras impurezas se asume que el °Brix representaría esa azúcar disuelta.

$$^{\circ}Bx = \frac{\text{Masa de Sacarosa}}{\text{Masa de sacarosa} + \text{Masa de Agua}} \quad (3.2)$$

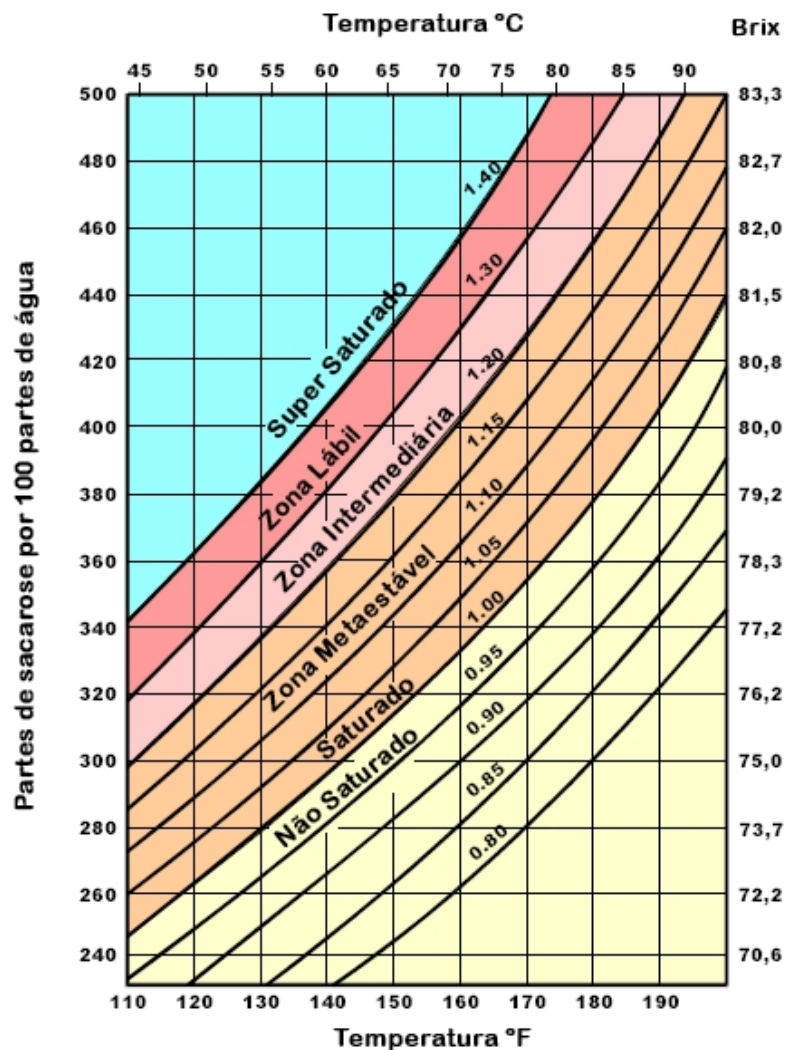


Figura 3.8 Curvas de Supersaturación de la sacarosa.
Fuente SMAR Sugar Boiling ^[20]

3.3.2 Pol y Pureza ^[7]

Pol es el porcentaje de azúcar contenido en el jugo de caña. Este es un parámetro que se obtiene en laboratorio para averiguar la pureza tanto de las mieles como de las masas cocidas.

La pureza es la cantidad de sacarosa real presente en una solución azucarada. Esta es una relación entre el Pol de la sustancia entre su °Brix.

$$Pza = \frac{Pol}{°Brix} \times 100 \quad (3.3)$$

Tabla 1. Pureza y °Brix de las masas cocidas.

Masa o Templa	Pureza (Pza)	Grado Brix (°Bx)
Masa I	80 - 85	91 - 92
Masa II	72 - 74	93 - 95
Masa III	60	96 - 98

3.3.3 Tachos de calandria ^[2]

Los Tachos de Calandria son evaporadores de simple efecto que trabajan al vacío. Estos tanques cilíndricos verticales trabajan por el principio de convección del calor por medio de vapor, el cual condensan al final de los tubos.

Están compuestos por un panel de tubos de cobre que forman la Calandria, esta estructura de tubos tiene una distribución parecida a un panal de abejas en los cuales se da la circulación del vapor.

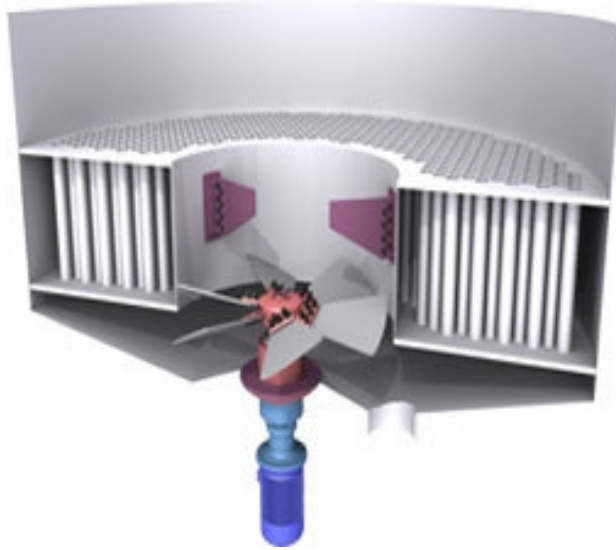


Figura 3.9 Vista lateral de una calandria.
Fuente: Metodología de procesos de cristalización del azúcar. ^[23]

En su interior tienen una alta tasa de circulación y transferencia de calor, lo que permite tener una gran velocidad de arrastre obteniéndose una circulación de la masa cocida.

Para ayudar a esta circulación de la masa, los tachos tienen un agitador eléctrico que permite que los cristales de azúcar puedan enriquecerse al tener movimiento, además, éste agitador hace que el vapor de 10 lbs con el cual se alimentan pueda distribuirse uniformemente.

3.3.4 Medición de °Brix por microondas ^[21]

Esta técnica fue utilizada exitosamente desde el año 1988 en mediciones de humedad en la industria del cemento ya que se basa en la interacción de microondas sobre las moléculas del agua con cambiantes campos electromagnéticos de alta frecuencia.

En la figura 3.8 se puede observar una molécula de agua, con sus dos átomos de hidrógeno de carga positiva ubicados a un lado y al otro lado el átomo de oxígeno de carga negativa, por lo que se observa que la molécula es un dipolo eléctrico.

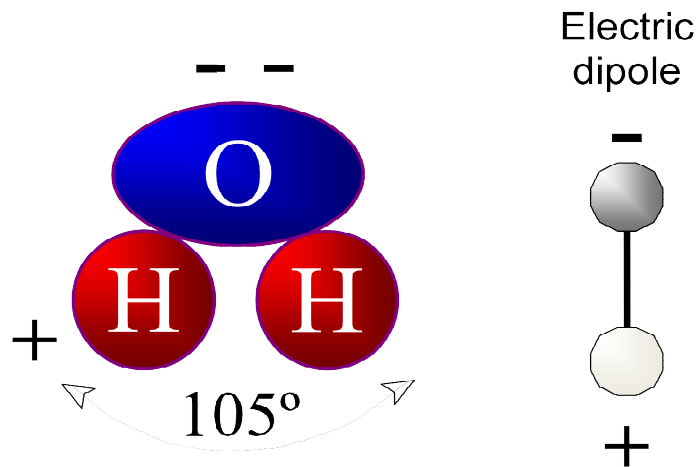


Figura 3.10 Molécula de agua, un dipolo eléctrico.

Fuente: Hydronyx ^[21]

El azúcar es un material covalente por lo que sus átomos están acoplados por participación de electrones, por lo tanto no están cargados eléctricamente y son un conductor pobre de electricidad.

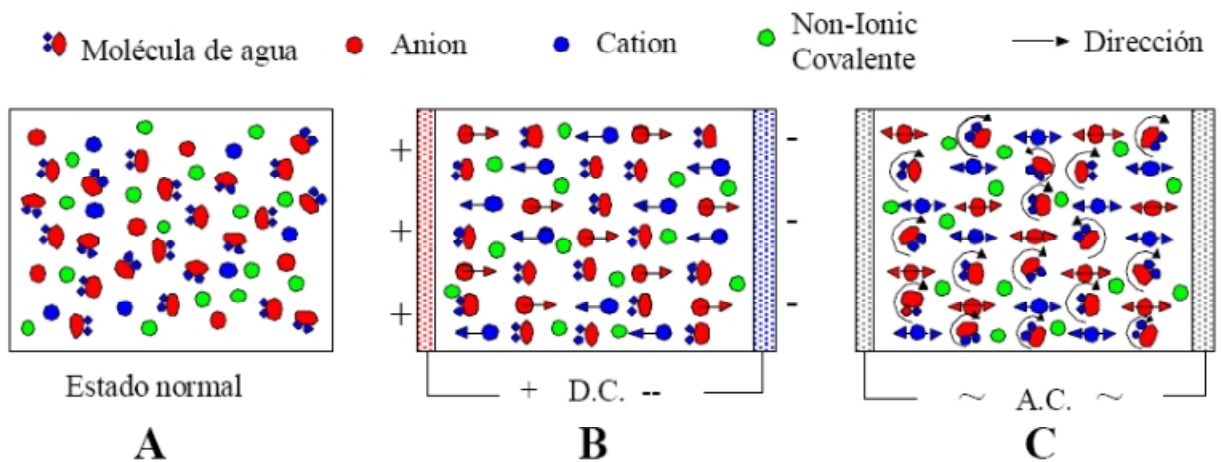


Figura 3.11 Molécula de agua, un dipolo eléctrico.

Fuente: Hydronyx ^[21]

Bajo condiciones normales todas estas moléculas e iones están orientados al azar como se observa en la figura 3.9 A. Si este material es sujeto a una corriente

eléctrica dc, las moléculas sensibles a campos electromagnéticos como agua (bi-polar) e iones, serán atraídas por la carga contraria, y se colocarán como en la figura 3.9 B. Los cationes serán atraídos en la dirección del cátodo y los aniones hacia el ánodo. La molécula del agua, siendo bi-polar, será alineada en la dirección pertinente.

Si ahora la solución es sujeta a una corriente AC oscilante, como en la figura 3.8 C, el material iónico oscilará hacia delante y hacia atrás siguiendo el cambio de polaridad, mientras las moléculas del agua darán vuelta por 180° con cada pulso.

Conforme la frecuencia se incrementa hasta el rango de microondas, se llega a un punto donde las moléculas de agua tienen dificultad en mantenerse solamente volteando y empiezan a girar. Estas moléculas altamente energizadas colisionan durante el proceso con material vecino generando calor y absorbiendo energía, como en un horno de microondas. Sin embargo, la inercia y fricción del material iónico normal impide el movimiento lineal rápido y el efecto eléctrico sobre el movimiento mecánico, y disminuye la energía absorbida. La mayoría de la energía absorbida estará en función del agua presente. Así, medir a una adecuada frecuencia alta, provee una técnica para medir humedad, y al medir la cantidad de humedad en el material se puede determinar la cantidad de °Brix que posee la misma, recordando que el brix es el porcentaje de sólidos en agua.

3.3.5 Medición de nivel por presión diferencial ^[22]

Para lograr medir un nivel o altura en un tanque se utilizan transmisores de presión como uno de los métodos existentes en la industria.

$$\rho = h \times SG \quad (3.4)$$

Si el nivel del líquido cambia la presión hidrostática cambia proporcionalmente. Por lo tanto se puede medir el nivel con un medidor de presión diferencial instalando el transmisor al nivel más bajo a ser medido, el nivel del líquido sobre el punto de

medición puede ser inferido a partir de la presión hidrostática despejando la altura de de la ecuación 3.4.

En el caso de un tanque cerrado y presurizado, como lo es el caso de los tachos, los cambios de presión pueden afectar el nivel del proceso. Por lo tanto se debe emplear la medición por presión diferencial con el fin de compensar la presión del tanque.

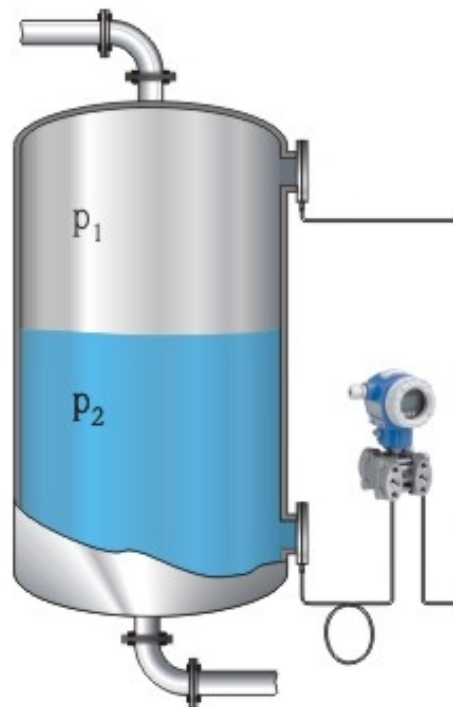


Figura 3.12 Medición de nivel por presión diferencial en un tanque presurizado.
Fuente Emerson Rosemount ^[22]

Cuando se utiliza un transmisor de éste tipo, los cambios de presión del contenedor afectan la toma de baja y alta presión del transmisor de igual forma, por lo que los efectos se cancelan.

El transmisor de alta presión conectado cerca del fondo del contenedor, mide la presión hidrostática más la presión del espacio de vapor. El transmisor de baja presión, conectado cerca de la parte superior del contenedor, mide solamente la presión en el

espacio de vapor. La diferencia de presión entre los dos transmisores es utilizada para determinar el nivel.

3.3.6 Protocolo Industrial HART ^[20]

El protocolo HART, acrónimo de High way – Addressable – Remote – Transducer, utiliza modulación por cambios de frecuencia (FSK) agrupando la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 DC. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 0 y 1 respectivamente, y que en conjunto forman una onda sinusoidal que se superpone al lazo de corriente de 4-20mA como se muestra en la figura 3.10.

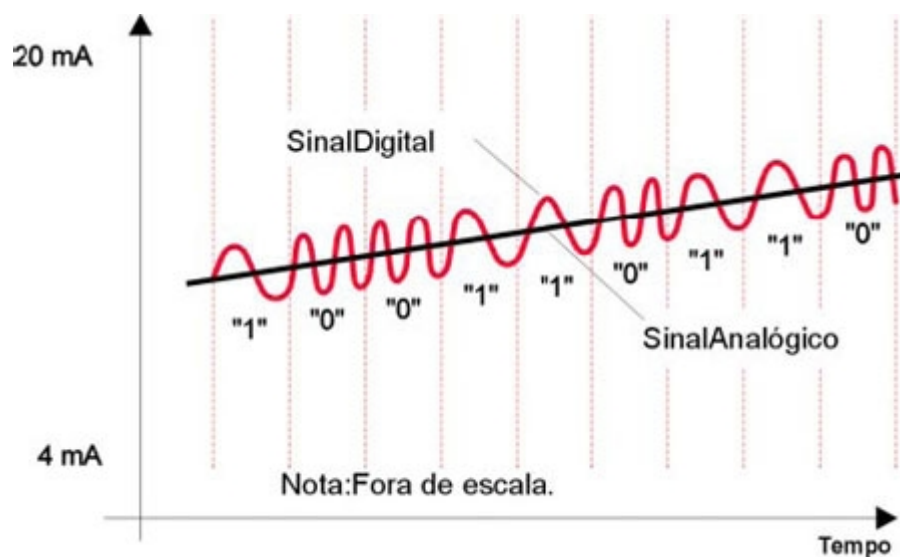


Figura 3.13 Protocolo industrial HART.
Fuente SMAR ^[20]

La variable primaria es la información de la señal de control que puede ser transmitida por la señal de 4- 20mA, mientras que las mediciones adicionales, parámetros de proceso, configuración del instrumento, calibración y las informaciones de diagnóstico están disponibles en el mismo par de hilos y al mismo tiempo. A diferencia de otras tecnologías de comunicación digitales “abiertas” para

instrumentación de procesos, el protocolo HART es compatible con los sistemas existentes.

3.3.7 Sistema de control de lazo cerrado ^[17]

Son sistemas de control realimentados en donde se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la salida de realimentación a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente.

Este sistema permite que el control sea más exacto y que no sea afectado por perturbaciones externas.

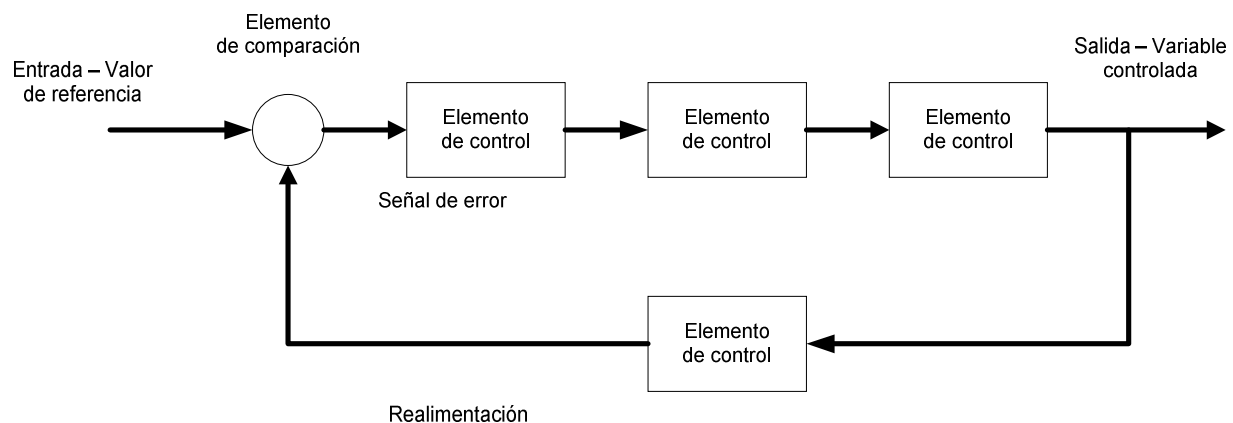


Figura 3.14 Bloques de un sistema de control de lazo cerrado.

3.3.8 Controlador PID ^[12]

Un regulador o controlador PID (proporcional, integral, derivativo) es un mecanismo de control retroalimentado en bucle cerrado ampliamente usado en sistemas de control industrial. Un PID calcula un error como la diferencia entre el valor actual del sistema y el valor al que se desea llegar. Además intenta minimizar el error mediante el ajuste de las entradas del proceso.

En el cálculo del regulador PID intervienen tres parámetros distintos. Estos valores se pueden interpretar en función del tiempo. El proporcional P depende del error actual, el integral I depende de la suma de todos los errores pasados, y el derivativo D es la predicción de errores futuros, basándose en la tasa de cambio actual. La suma ponderada de los tres términos permite ajustar un proceso mediante un elemento de control.

Mediante el ajuste de estas tres constantes en el algoritmo de control PID, el regulador es capaz de proporcionar acciones de control específicas a los requerimientos de un sistema. La respuesta del regulador se puede describir como la capacidad de respuesta ante un error, el grado en que el regulador llega más allá del punto de ajuste, y la oscilación del sistema.

El ajuste de las constantes se logra mediante el análisis del sistema se puede llegar a ajustar el tiempo de respuesta, que es cuánto tiempo tarda el regulador en llevar al sistema a cierto estado. También se puede ajustar que el sistema llegue sin errores de posición y minimizar las sobreoscilaciones alrededor de la referencia o estado deseado.

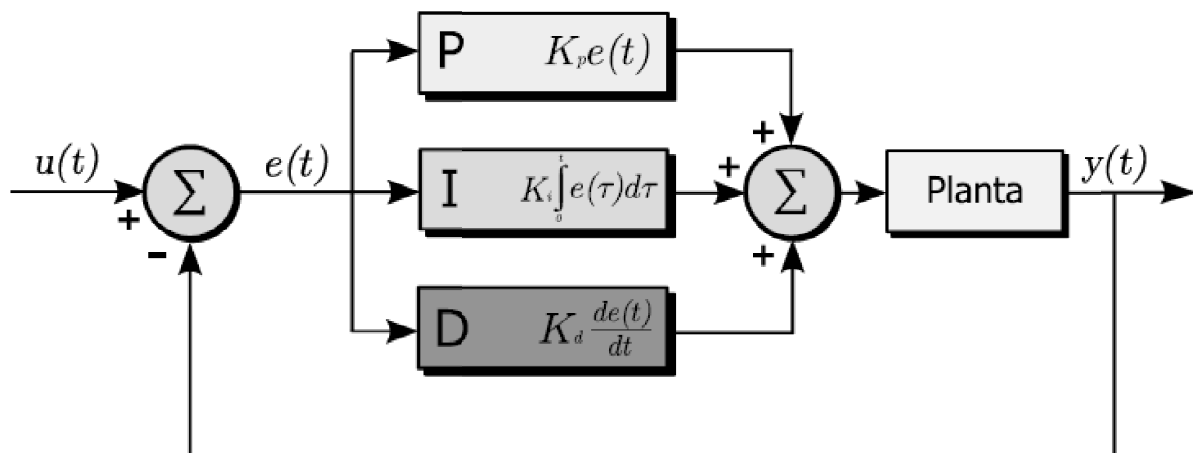


Figura 3.15 Diagrama de bloques de un regulador PID.

3.3.9 Controlador Lógico Programable PLC ^[5]

El controlador lógico programable es un dispositivo digital que opera de manera secuencial y cíclica que utiliza una memoria para el almacenamiento interno de instrucciones para implementar funciones específicas tales como registro y control de tiempos, secuenciación, lógica, conteo y operaciones aritméticas, para controlar a través de entradas/salidas digitales o analógicas varios tipos de máquinas o procesos industriales.

Se puede hablar de las siguientes ventajas del uso de los PLC frente a lógica cableada antigua:

- Menor tiempo empleado en la elaboración del proyecto.
- Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado ni añadir elementos.
- Reducido espacio de ocupación.
- Menor costo de mano de obra de instalación.
- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento, al quedar reducido el de cableado.
- Posibilidad de controlar varias máquinas con el mismo autómata.
- Economía de mantenimiento.
- Si por alguna razón la máquina queda fuera de servicio, el PLC sigue siendo útil para otra máquina o sistema de producción.

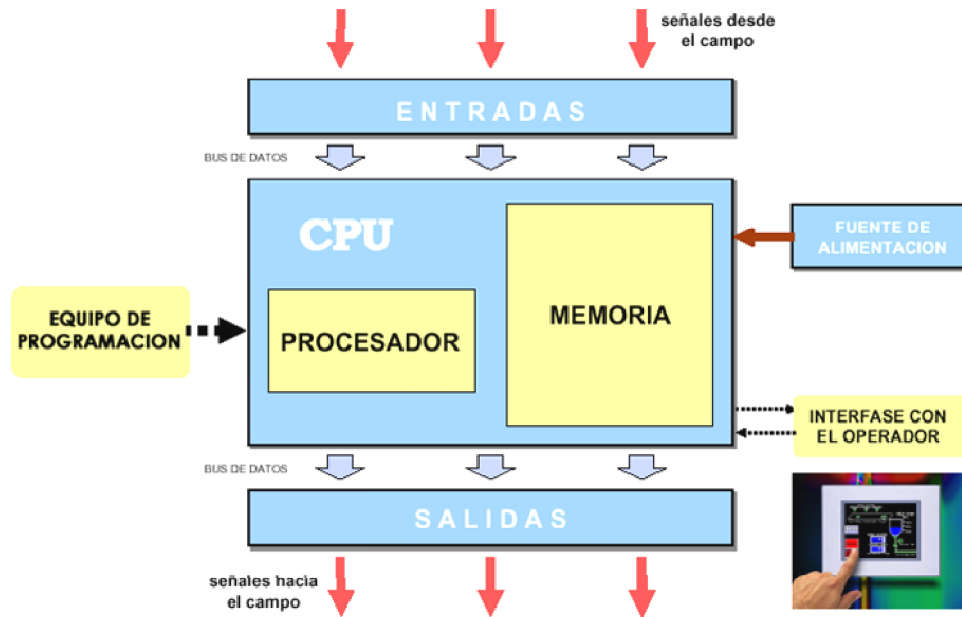


Figura 3.16 Diagrama de bloques de un PLC.
Fuente Aplicaciones del PLC. ^[5]

3.3.10 Método de Conectividad OPC ^[11]

OPC acrónimo de Object Linking and Embedding for Process Control, es un método de conectividad abierto e independiente basado en los estándares más populares del mundo. Es utilizado para comunicar dispositivos, controladores y aplicaciones sin la necesidad de utilizar protocolos propietarios en la industria.

El OPC crea una “capa de abstracción” intermedia situada entre la Fuente de Datos y el Cliente de Datos. Esa capa se consigue utilizando dos componentes llamados Cliente OPC y Servidor OPC.

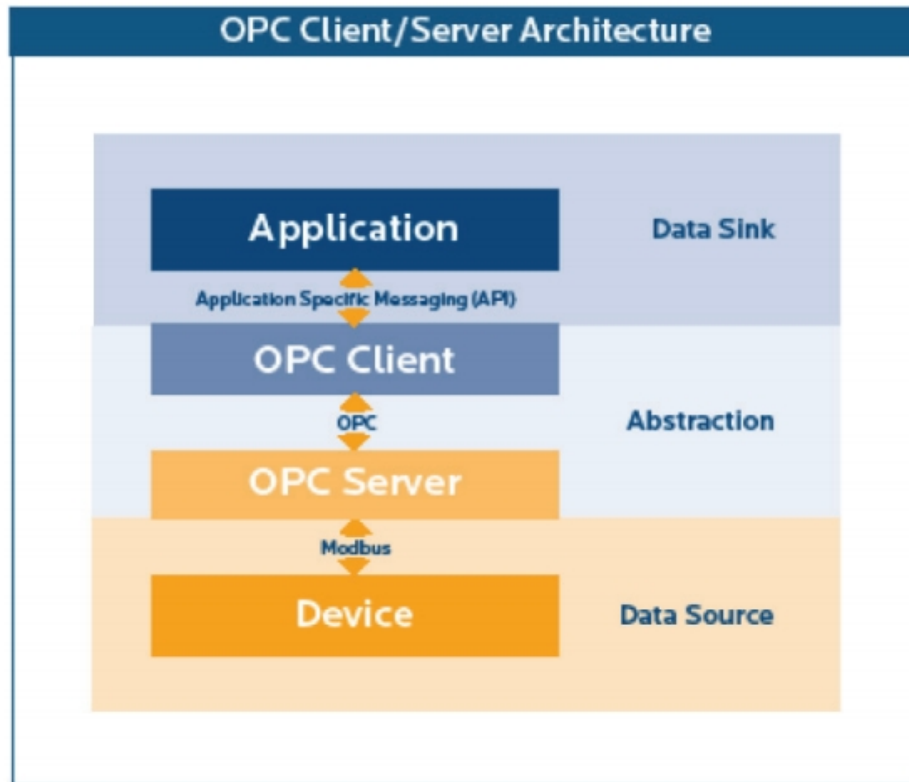


Figura 3.17 Diagrama de la arquitectura Cliente/Servidor OPC.
Fuente Guía para entender la tecnología OPC. ^[11]

El **Servidor OPC** es una aplicación de software que permite traducir la comunicación entre el protocolo propietario de la fuente de datos y el mundo OPC. Este servidor es direccional por lo que se puede realizar tanto escrituras en el dispositivo como lecturas.

El Servidor OPC tiene tres módulos de funcionamiento, los cuales son los siguientes:

- **Módulo de comunicaciones OPC:** Su función principal es la de comunicar el Servidor OPC con el Cliente OPC.
- **Módulo de comunicaciones nativas:** El Servidor OPC emplea la el método de comunicación más eficiente con la fuente de datos, que en muchos casos implica comunicarse con la fuente de datos mediante el uso de protocolos propietarios o a través del uso de una Interfaz de Programación de la Aplicación (API).

- **Módulo de traducción/mapeado:** La función de este modulo es la de interpretar de forma adecuada las peticiones OPC entrantes de un cliente OPC, convirtiéndolas en peticiones nativas que se envían a la fuente de datos y viceversa.

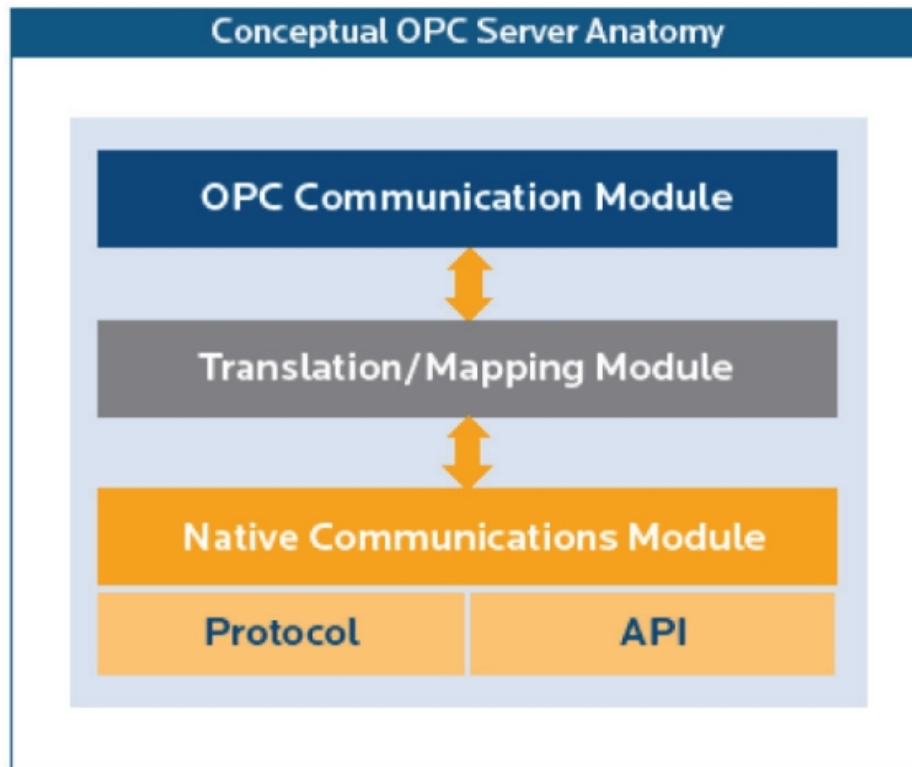


Figura 3.18 Diagrama de la arquitectura de un Servidor OPC.
Fuente Guía para entender la tecnología OPC. ^[11]

Un **Cliente OPC** es un módulo de software utilizado por una aplicación que le permite establecer, iniciar y controlar una comunicación con cualquier servidor OPC. Los clientes OPC traducen las peticiones de comunicación provenientes de una aplicación dada en la petición OPC equivalente y la envían al servidor OPC adecuado para que la procese.

Cuando los datos OPC vuelven del servidor OPC, el cliente OPC los traduce al formato nativo de la aplicación para que ésta pueda trabajar de forma adecuada con los datos.

Tiene una estructura parecida al del Servidor OPC contando con tres módulos.

- **Módulo de comunicaciones OPC:** se encarga de establecer la comunicación con el servidor OPC, intercambiar datos con él y desconectarse sin desestabilizar el servidor OPC.
- **Módulo de comunicaciones con la aplicación:** permite que la información del servidor OPC sea transferida a una aplicación de software específica a través del cliente OPC por lo que realiza una serie de llamadas a la API de la aplicación.
- **Módulo de traducción/mapeado:** traduce de forma bidireccional la información que la aplicación necesita leer o escribir al dispositivo o fuente de datos.

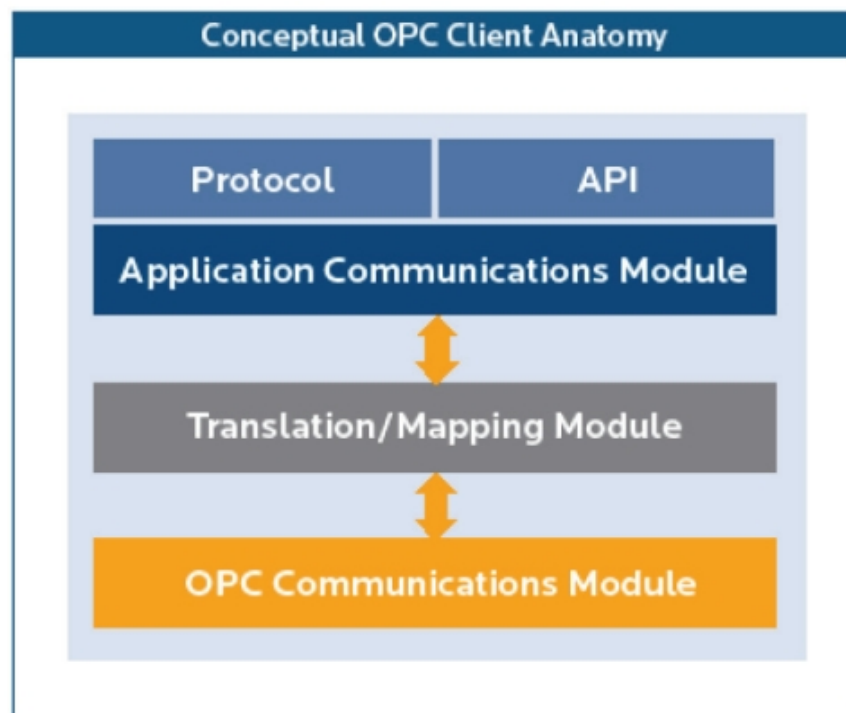


Figura 3.19 Diagrama de la arquitectura de un Cliente OPC.
Fuente Guía para entender la tecnología OPC. ^[11]

3.3.11 Sistema SCADA ^[13]

Los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) son aplicaciones de software de control de producción, que se comunica con los dispositivos de campo y controla el proceso de forma automática desde la pantalla del ordenador.

El control directo lo realizan los controladores lógico programables y están conectados a un ordenador que realiza las funciones de diálogo con el operador, tratamiento de la información y control de la producción, utilizando el SCADA.

Dentro de sus funciones se pueden mencionar las siguientes:

- **Adquisición de datos**, para recoger, procesar y almacenar la información recibida.
- **Supervisión**, para observar desde un monitor la evolución de las variables de control.
- **Control**, para modificar la evolución del proceso, actuando sobre los reguladores como alarmas, menús y otros, o bien directamente sobre el proceso mediante las salidas conectadas.
- **Transmisión**, de información con dispositivos de campo y otros PC.
- **Base de datos**, gestión de datos con bajos tiempos de acceso. Suele utilizar ODBC.
- **Presentación**, representación gráfica de los datos. Interfaz del Operador o HMI (Human Machine Interface).
- **Explotación**, de los datos adquiridos para gestión de la calidad, control estadístico, gestión de la producción y gestión administrativa y financiera.

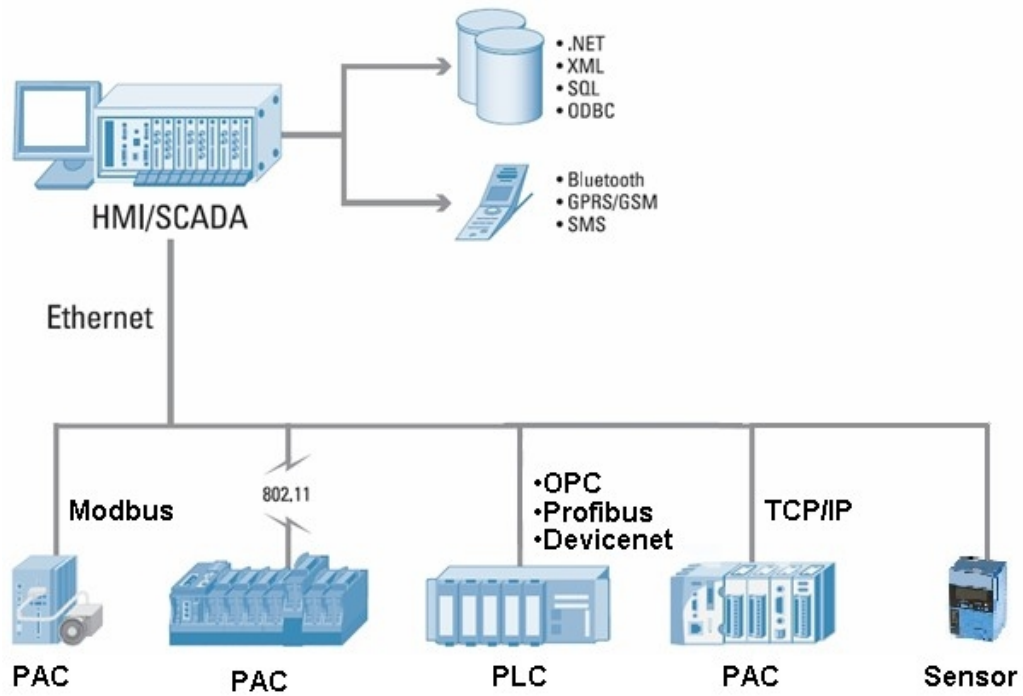


Figura 3.20 Representación de un Sistema SCADA.
Fuente: Sistema SCADA. ^[13]

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

En el presente capítulo se expondrá brevemente la solución escogida al problema previamente descrito, con el fin de orientar al lector sobre la implementación de la tecnología, dispositivos y estrategias utilizadas.

4.1 Reconocimiento y definición del problema

La azucarera El Viejo S.A. siempre ha sido pionera en la implementación de tecnologías en el ingenio, por lo tanto la mayoría de sus procesos industriales están debidamente automatizados o al menos se emplea equipo de instrumentación para ayudar a monitorear y controlar el proceso.

En el caso del Piso de Tachos, hace un tiempo atrás se intentó contar con una medición del °Brix mediante la utilización de transmisores de densidad pero no fueron tan precisos, por lo que los dispositivos fueron descartados.

El principal limitante en el proceso de monitoreo y automatización de un tacho es la correcta medición del °Brix, ya que para elaborar las masas cocidas es fundamental este parámetro, por lo que durante muchos años no se pudo completar el proyecto debido a la falta de confiabilidad de la medición de °Brix.

Mediante la experiencia del uso de transmisores de microondas acumulada por personeros de la empresa Fives Fletcher con base en Francia, se hizo la recomendación directa al ingenio sobre la implementación de la tecnología de medición de °Brix por microondas. Por lo tanto el ingenio se dio a la tarea de comprar 5 transmisores que intentaron colocar en los tachos pero que por la falta de una adecuada calibración no proporcionaron una correcta medición del °Brix.

Es por esa situación que cuando se dio la primera visita a la planta azucarera el problema salió a relucir, ya que existía una inversión en equipo que no se había podido aprovechar, por lo tanto se procedió a investigar cómo debían ser instalados y configurados los transmisores de °Brix en los tachos, y además, se planteó la idea de

automatizar de forma completa algunos de los tachos para mejorar la obtención y producción de los cristales de azúcar.

De la situación anterior se derivó una investigación en el proceso de operación de los tachos y del sistema de doble magma empleado en la elaboración del azúcar, para determinar las variables que estarían involucradas en la cocción y preparación de las masas.

Una vez determinadas las variables involucradas en el proceso, se procedió a la debida instalación del cableado de comunicación y de los transmisores en los tachos en los meses de octubre y noviembre, antes de que iniciara la temporada de zafra que estaba destinada para arrancar en diciembre del año 2012.

Establecido el plan de ataque al problema, se establecieron cronogramas de trabajo para empezar en la primera semana del mes de diciembre para aprovechar los 5 meses seguidos de la zafra 2012 – 2013.

De esa forma dio inicio el proyecto de monitoreo y automatización aquí descrito.

4.2 Obtención y análisis de la información

La información requerida para el proyecto se basó en entrevistas a los maestros tacheros, debido a que algunos de ellos acumulan hasta 30 años de experiencia en la obtención manual del azúcar. El trabajo desempeñado por los tacheros es muy complejo por lo complicado del procedimiento empleado en el sistema de doble magma, a algunos de ellos les toma hasta 5 años poder aprender el oficio.

La información presente en la literatura y en internet es muy limitada, aunque exista un estándar en el sistema, no es aplicable a las condiciones de operación de cada ingenio. Con el pasar de los años los tacheros han perfeccionado y mejorado la técnica para el mejor aprovechamiento de las masas cocidas.

Tomando como referencia la experiencia de los tacheros y complementando con una investigación bibliográfica se identificaron las variables principales del proceso, las cuales fueron °Brix y Nivel.

Conforme se realizaba la calibración de las mediciones se encontró que el proceso de cristalización del azúcar era muy delicado, porque si no se cuentan con las condiciones óptimas se podía dar una reproducción anormal del grano, por lo que se determinó limitar la automatización solamente al proceso de masa de tercera aunque también podía ser compatible con los procesos de desarrollo.

Siendo este proyecto de mucho interés por parte del ingenio, se contó con apoyo total para la obtención de presupuestos.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de la solución

La evaluación de las alternativas de la solución se basó primeramente en la confiabilidad de la medición de °Brix, lo cual era de vital importancia para la correcta realización del proyecto. A pesar que el transmisor de microondas es considerablemente más costoso que un transmisor de densidad, es también más preciso y confiable, por lo tanto, el criterio principal fue el de contar con la mejor tecnología disponible para garantizar mediciones reales.

Una vez determinado el tipo de transmisor para °Brix se procedió a realizar las respectivas calibraciones para su correcta operación, logrando obtener valores de mediciones representativas reales del estado de la concentración del material.

El proceso de la fabricación del azúcar se basa prácticamente en seguir una receta perfeccionada por los tacheros, por lo tanto, la metodología consistió en reproducir esa receta mediante el accionar de válvulas neumáticas de acuerdo a las condiciones de la concentración y nivel del tacho, todo gobernado por instrucciones programadas en un controlador digital.

Para la evaluación final de la solución se realizaron pruebas de campo en las que se puso el sistema de control a trabajar, en las cuales se lograron los resultados esperados.

4.4 Implementación de la solución

Para la implementación de la solución se dividió el proyecto en diferentes etapas en las cuales se necesitaba concluir una para continuar con las siguientes.

4.4.1 Calibración de los transmisores

Primero se necesitaba contar con una medición de °Brix confiable y precisa para aportar credibilidad al proyecto, para esto fue necesario calibrar los transmisores tomando muestras de las masas directamente de los tachos para enviarlas al laboratorio, luego hacer un ajuste de curvas en la operación del transmisor para que la medición de campo fuera similar a la medición del laboratorio.

Los transmisores de nivel por presión diferencial también debieron de ser calibrados para ajustar los niveles de 0 hasta el 100% del tacho.

4.4.2 Conexión de los transmisores a controladores

Utilización de protocolo de comunicación analógico HART para la lectura de los transmisores de °Brix, Temperatura y Nivel. Interconexión por medio de regletas en un gabinete.

4.4.3 Conexión de controladores a PC

Conversión de protocolo RS485 a Ethernet para facilitar la comunicación con el controlador por medio de la red.

4.4.4 Servidor OPC

Se implementó un servidor OPC para establecer una comunicación efectiva entre el controlador y el software SCADA.

4.4.5 Software SCADA

Programa especializado en automatización en el cual se integró un Cliente OPC, se desarrollaron pantallas de monitoreo y además, se crearon pantallas para la manipulación de variables para el control automático del proceso.

4.4.6 Válvulas con actuador y posicionador neumático

La manipulación de la cocción de las masas se realizó mediante el accionamiento de válvulas de alimentación de mieles y de agua en la entrada del tachó.

4.5 Reevaluación y rediseño

Una de las mejoras más significativas que puede tener el sistema de control automático de los tachos es la de controlar la alimentación de vapor, al controlar el vapor se puede llevar a cabo el proceso de cristalización de forma automática con el mismo sistema.

También es necesario contar con mediciones de los niveles de las mieles, para determinar en qué momento hay que suministrar mayor o menor cantidad de miel al tachó.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

En este capítulo se expone al lector las soluciones preliminares y la elección final de esta. También se explican con gran detalle cada uno de los componentes del sistema empleado, dividido en software y hardware, los cuales están conformes a los objetivos planteados al inicio de este informe.

En la figura 5.1 se aprecia el diagrama general del sistema, en los tachos #1, #6, #8 y #9 se monitorea el °Brix, la temperatura y el Nivel en tiempo real mientras que solamente el tacho #9 se controla de forma automática con el uso de una rutina de control y el accionar de válvulas neumáticas.

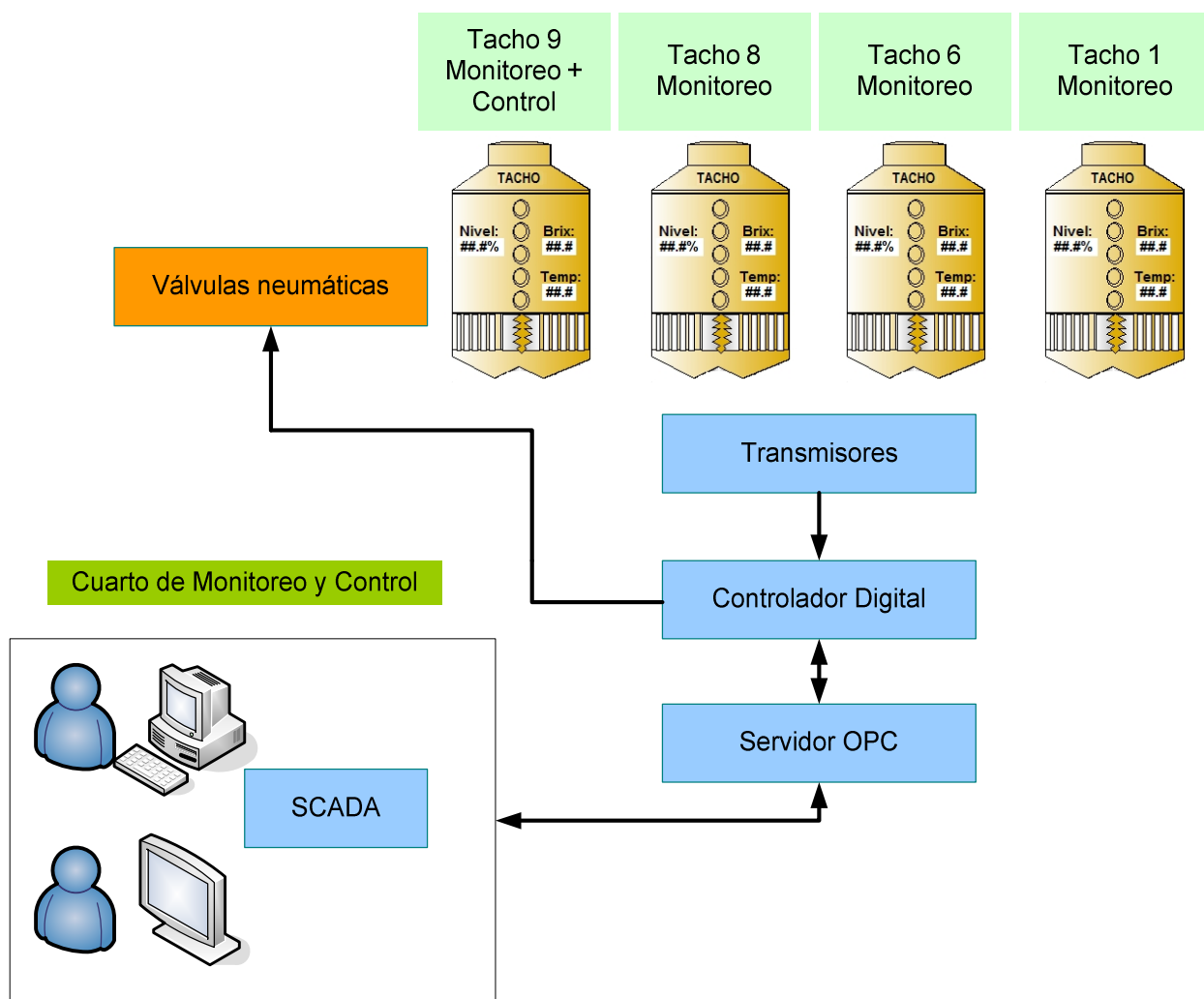


Figura 5.1 Diagrama general del sistema.

5.1 Análisis de soluciones y selección final

Las soluciones analizadas a continuación son las que se evaluaron en la realización de este proyecto.

5.1.1 Transmisor de °Brix

Dos de las tecnologías más empleadas en la medición de grado brix en la industria azucarera son las que se describen a continuación.

5.1.1.1 Transmisor por Densidad SMAR DT301 ^[20]

Consiste en un transmisor de presión diferencial de tipo capacitivo acoplado a un par de repetidores de presión inmersos en el proceso. Los repetidores están conectados a un sensor capacitivo externo a través de tubos capilares. Un sensor de temperatura localizado entre los dos repetidores de presión automáticamente compensa las variaciones de temperatura en el proceso.

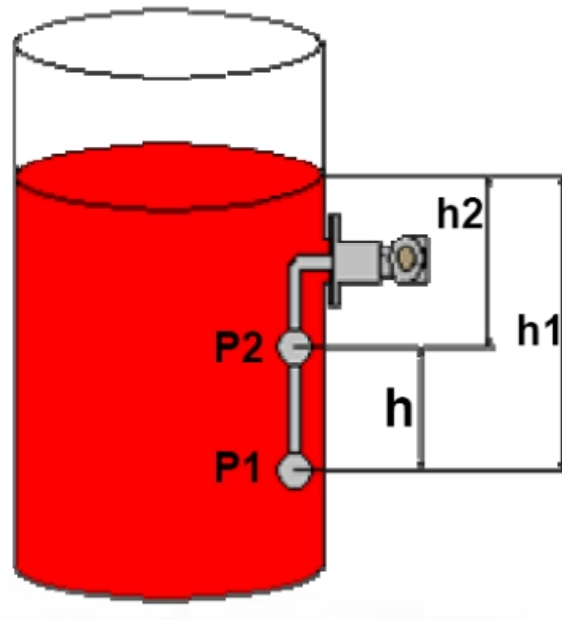


Figura 5.2 Funcionamiento del SMAR DT301.
Fuente SMAR Sugar Boiling. [20]

5.1.1.2 Transmisor por microondas Hydrotrac HT02 ^[21]

El sensor irradia un campo electromagnético de microondas dentro del material, como se muestra en 5.3. Cualquier variación en la humedad del material afectará la energía absorbida. Estos cambios en absorción pueden ser detectados por la antena que emite el campo electromagnético por medio de un circuito detector. Tiene la gran ventaja de que permite realizar un ajuste de curva para linealizar la salida del transmisor para que el valor medido en °Brix sea más preciso y se ajuste al valor real.

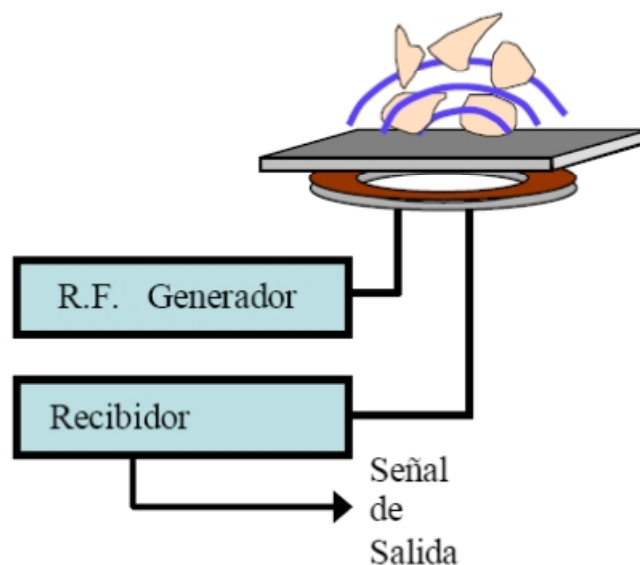


Figura 5.3 Funcionamiento del SMAR DT301.
Fuente Hydrotrac HT02 Manual de Operación. ^[21]

El transmisor de °Brix más funcional era el de mediciones por microondas ya que puede ser calibrado para lograr obtener una medición real del proceso, además de que no es afectado por los cambios de vapor, presión o por la densidad del material.

5.1.2 Controlador Digital Programable

Existen muchas variedades de tecnologías y tipos de controladores industriales, dentro de las opciones que se estudiaron están las siguientes.

5.1.2.1 PLC SMAR LC700 ^[5]

El PLC SMAR LC700 es un controlador híbrido muy potente que incorpora funciones discretas de automatización, tareas de automatización, control de proceso regulatorio continuo y control por baches. Su método de programación es en escalera y necesita la integración de módulos de entrada/salida.



Figura 5.4 Controlador SMAR LC700.
Fuente SMAR Digital Controller. ^[5]

5.1.2.2 Controlador Digital Multiloop SMAR CD600 Plus ^[5]

El CD600 Plus es un controlador versátil de módulo único, puede controlar simultáneamente hasta 4 lazos de control, tiene integrados 8 controladores PIDs y muchas estrategias de control sofisticadas. Este controlador tiene una plataforma de hardware de entradas y salidas muy versátil, sustituye hasta 8 controladores tradicionales y varios módulos acondicionadores de señal y cableado.



Figura 5.5 Controlador SMAR CD600 Plus.
Fuente SMAR CD600 Plus Manual de Operación. ^[5]

Para las rutinas de control se escogió el controlador CD600 Plus porque es un controlador que ya tiene módulos de entrada y salida integrados al sistema, además de poseer bloques de PID muy potentes.

5.1.3 Medio de comunicación eléctrica

Uno de los detalles más importantes en la implementación de sistemas de control y monitoreo es el tema de la comunicación, existen muchos protocolos a nivel industrial y algunos son más sencillos que otros.

5.1.3.1 Comunicación Serial ^[10]

El protocolo Modbus RTU está basado en la arquitectura maestro/esclavo y se conecta al controlador mediante comunicación serial RS485.

5.1.3.2 Ethernet ^[10]

Para tener mayor versatilidad en la comunicación se puede emplear una red Ethernet en la que varias computadoras pueden estar conectadas al controlador por medio de una dirección IP.

La comunicación Ethernet por red era la más adecuada para la implementación del proyecto debido a que se pensó en utilizar un servidor OPC para que la información fuera accesible desde cualquier ubicación de la red interna del ingenio.

5.2 Descripción del hardware

En esta sección se describen detalladamente los dispositivos utilizados como los transmisores, el controlador y los convertidores.

5.2.1 Transmisores utilizados

Los transmisores que se utilizaron para el proyecto se instalaron en los tachos y en un tanque fundidor de magma, se comunicaron por protocolo HART de 4 a 20 mA y por protocolo RS485 para su debida calibración.

5.2.1.1 Transmisor Hydrotrac HT02

Este transmisor de °Brix funciona por microondas como anteriormente se ha descrito, su frecuencia de operación es de 800 MHz y no es afectado por la pureza del material a medir. Este transmisor cuenta con dos sensores, uno de °Brix por microondas y otro sensor para la temperatura.



Figura 5.6 Transmisor Hydrotrac HT02.
Fuente Hydrotrac HT02 Manual de Operación. ^[21]

Para su correcto funcionamiento fue necesario instalarlo en los tachos siguiendo las especificaciones del fabricante porque tiene una cara plana de cerámica, que es la superficie por la que mide la humedad en el material.

El diámetro de medición de la onda es de aproximadamente 10 cm, y el rango de medición de °Brix es de 50 a 98 °Brix, por lo que se ajustaba perfectamente a todos los requerimientos de las plantas tanto de primera, segunda y las de tercera.

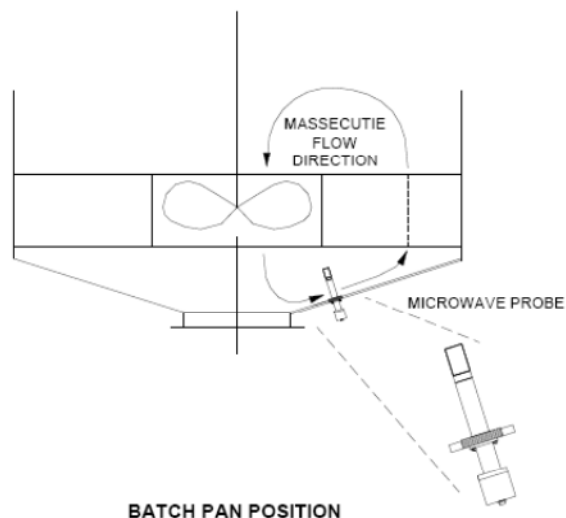


Figura 5.7 Instalación del Transmisor Hydrotrac HT02.
Fuente Hydrotrac HT02 Manual de Operación. ^[21]

Para conectar los transmisores a la computadora para su calibración se utilizó la señal RS485 del puerto de comunicación de los transmisores en serie, con el empleo de un convertidor de RS485 a RS232 (figura 5.8) y con el uso del software propietario del sensor llamado Hydronix presentado en la sección de software.

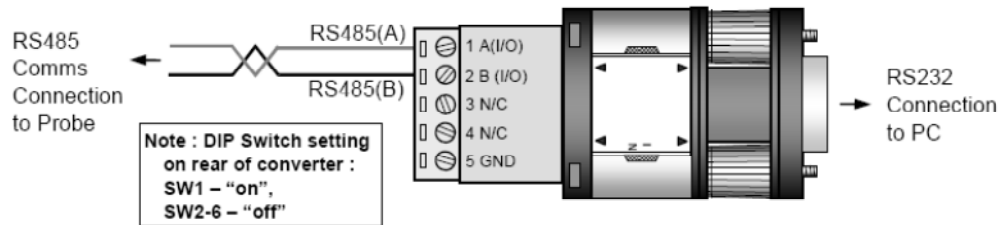


Figura 5.8 Convertidor de RS485 a RS232 para el transmisor Hydrotrac HT02.

Fuente Hydrotrac HT02 Manual de Operación. ^[21]

5.2.1.2 Transmisor Emerson Rosemount 2051L ^[22]

Este transmisor mide el nivel de un tanque cerrado por presión diferencial, cuenta con dos tomas de presión, una para presión alta y otra para presión baja, fue instalado a la base del tacho y se le dio una altura de 100" de agua para la toma de la presión en baja. En la figura 5.9 se puede observar el transmisor y en la figura 5.10 el método para calibración utilizando un configurador HART en el que se tenían que ingresar los parámetros relacionados con la altura de la columna de agua, la baja presión y la alta presión.



Figura 5.9 Transmisor EMERSON Rosemount 2051L.

Fuente Rosemount 2051L Manual de Operación. ^[22]

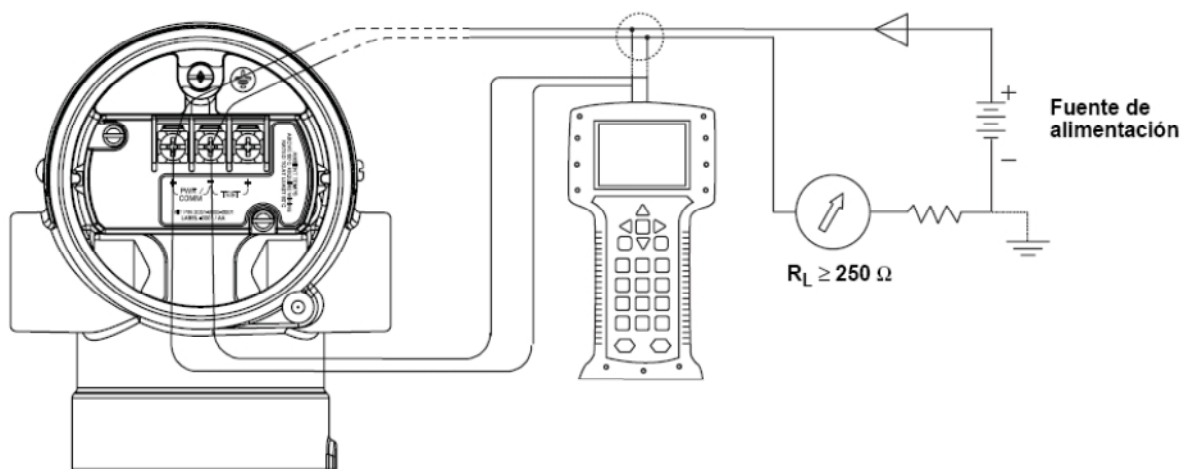


Figura 5.10 Calibración de transmisor 2051L con configurador HART.

Fuente Rosemount 2051L Manual de Operación. ^[22]

La interconexión de estos transmisores desde los tachos hasta el panel de conexiones eléctricas se observa en la figura 5.11.

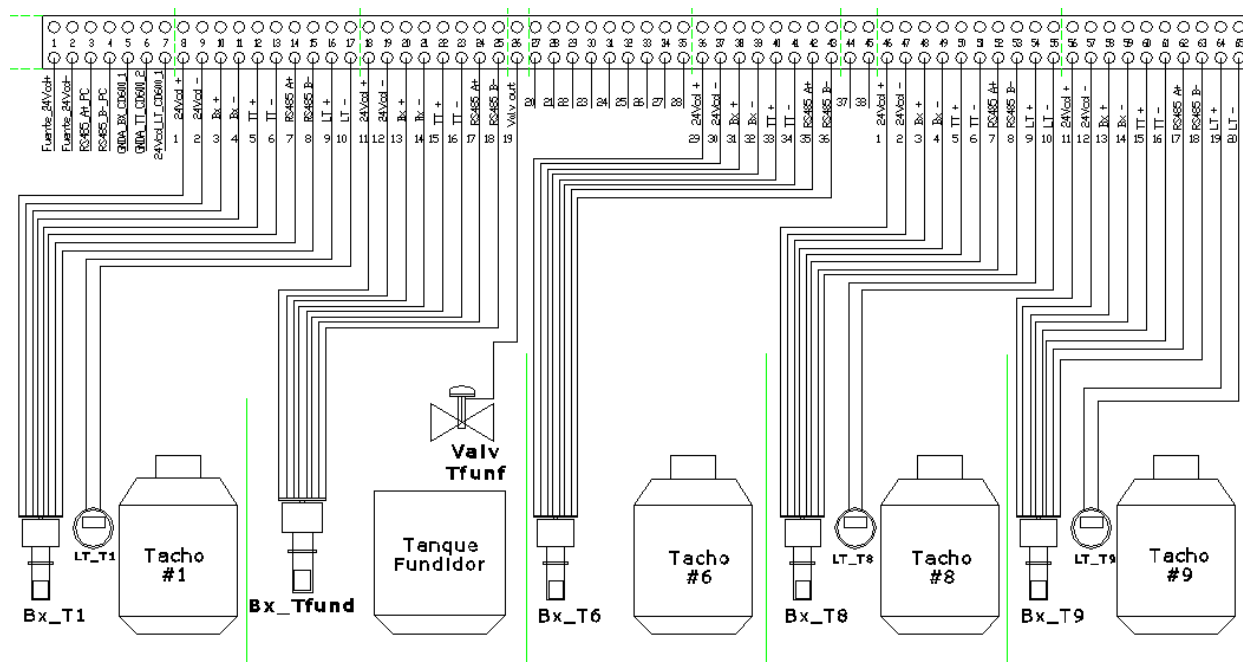


Figura 5.11 Interconexión entre transmisores a regletas en panel de conexión.

5.2.2 Controlador SMAR CD600 Plus ^[5]

Este controlador está diseñado para comunicarse con transmisores que utilicen el protocolo industrial HART, tiene 8 entradas analógicas, 4 entradas digitales, 8 salidas analógicas y 8 salidas digitales. Por lo tanto se necesitaron dos controladores, uno para las señales de °Brix y nivel, y el otro para las señales de temperatura.

En la parte visual el controlador cuenta con barras graficas de 101 leds para indicación del Setpoint y de la Variable de Proceso, barra gráfica de 41 leds para indicación de la salida de proceso (mV), display alfanumérico de 8 dígitos para indicaciones en general, LEDs para indicación de estado, alarmas y monitoreo de lazo, teclas de Función.

Tiene 4 lazos de control independientes donde se pueden utilizar diferentes bloques de control incluyendo 8 bloques de controladores PID de los cuales se utilizó

uno para el control del tacho 9 y otro para un control pequeño de un tanque fundidor de magma.

En la figura 5.5 anteriormente mostrada se puede observar el aspecto físico del controlador digital, en cambio en la figura 5.12 se observa la interconexión de ambos controladores utilizados con las señales de los transmisores provenientes de los tachos.

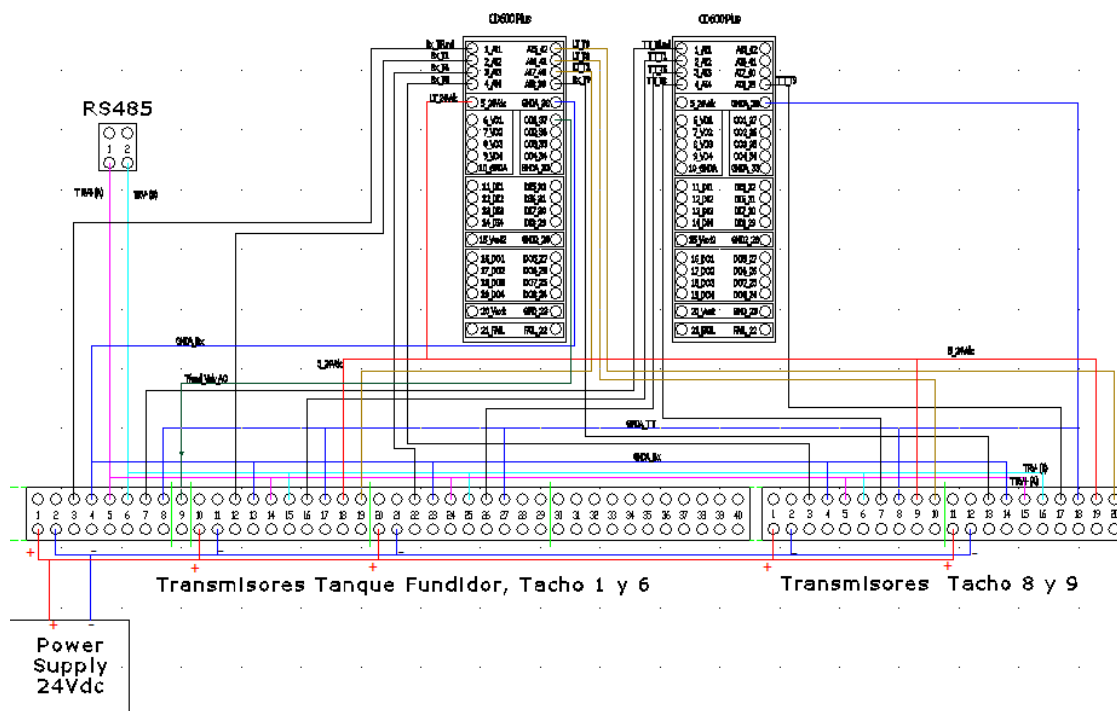


Figura 5.12 Conexión regletas del panel de transmisores hacia controladores.

5.2.3 Interfaz de conversión ENET-710 ^[10]

La interfaz de conversión ENET-710 es un módulo de comunicación de datos que sirve como un puente entre las redes Ethernet y Serial, se comunica con el controlador CD600 Plus a través del protocolo serial Modbus RTU utilizando los puertos RS485 y convierte la comunicación a Ethernet proporcionando a las computadoras de la red la capacidad de ejecutar el monitoreo remoto y el control de los equipos industriales. La comunicación Ethernet que brinda el convertidor es de 10/100 Mbps y

utiliza protocolo TCP/IP siendo compatible con cualquier tarjeta LAN de una computadora.

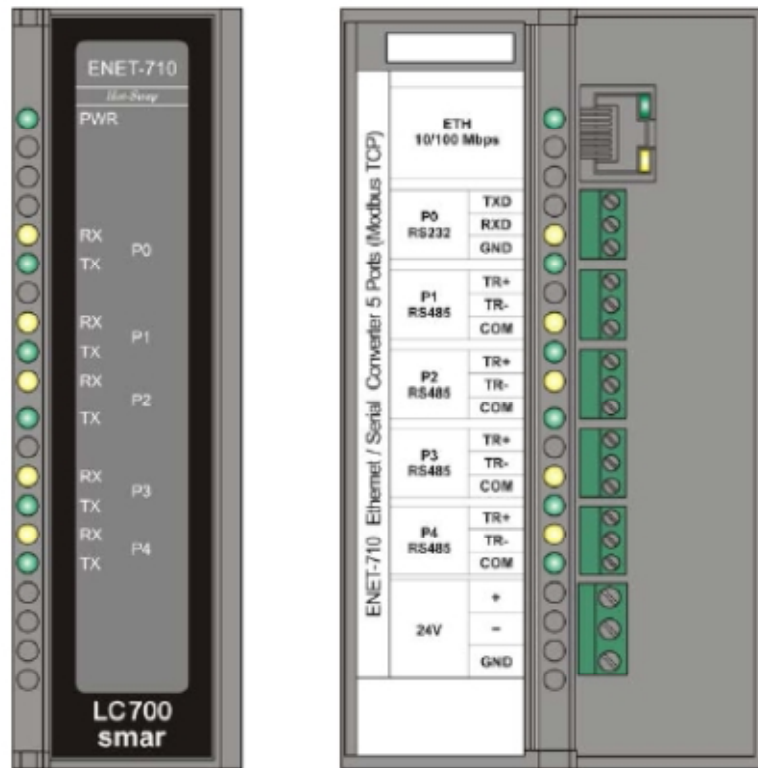


Figura 5.13 Módulo de conversión ENET-710.
Fuente SMAR ENET-710 Manual de Operación. ^[10]

5.2.4 Válvulas neumáticas

Las válvulas se utilizaron para manipular el proceso de masas de tercera, aumentando o disminuyendo la alimentación de miel II y de agua al tachó.

Estas válvulas se componen de tres partes las cuales son las siguientes:

- Una válvula de mariposa.
- Un actuador neumático.
- Un posicionador electro neumático.

Trabajan por medio de presión de 100lbs de aire comprimido y el posicionador opera por protocolo HART de 4 a 20mA, por lo tanto se conectan a las salidas analógicas de los controladores como se puede observar en la figura 5.14.

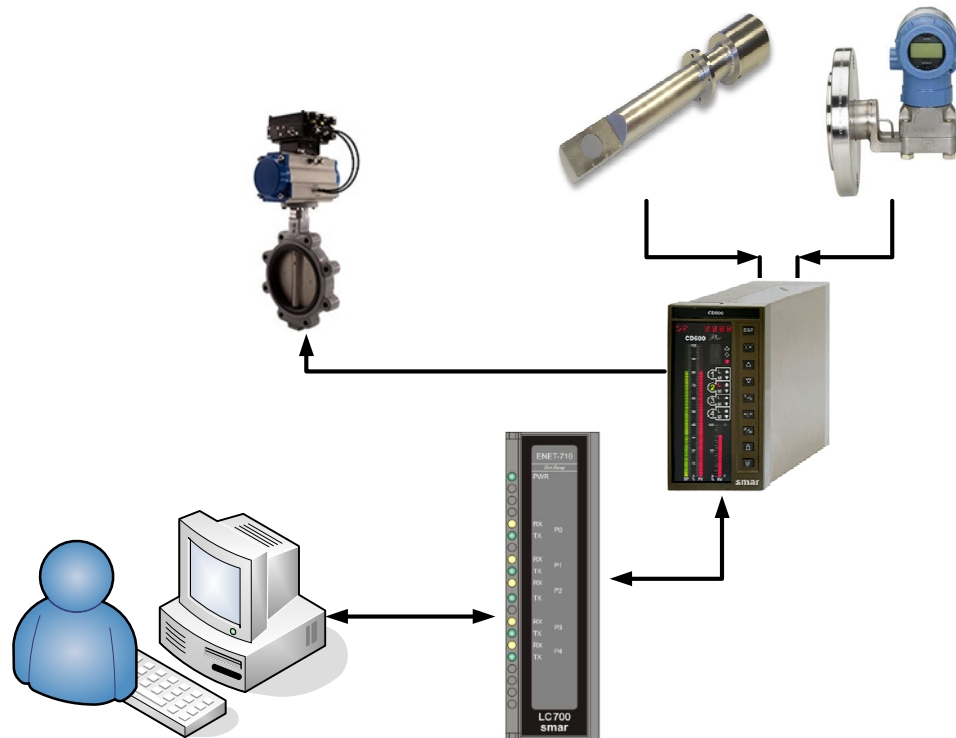


Figura 5.14 Implementación física del hardware.

5.3 Descripción del software

El software empleado en la implementación de este proyecto abarca la aplicación para calibración de los transmisores de °Brix, el programa para programar el controlador, la rutina de control empleada, el servidor OPC y el software SCADA aplicado en el monitoreo y control automático de los tachos.

5.3.1 Hydronix Hydro-Com ^[21]

Este programa está diseñado para monitorear, calibrar y dar mantenimiento a los transmisores Hydrotrac HT02 de microondas. Se comunica por protocolo RS485 mediante el uso de un convertidor de RS485 a RS232 para poder conectarse a la computadora de escritorio.

Cuando se conectan por primera vez los transmisores se les debe de asignar una dirección ya que están conectados en serie entre ellos, una vez que se conectan hay que configurar las salidas, como se muestra en la figura 5.15.

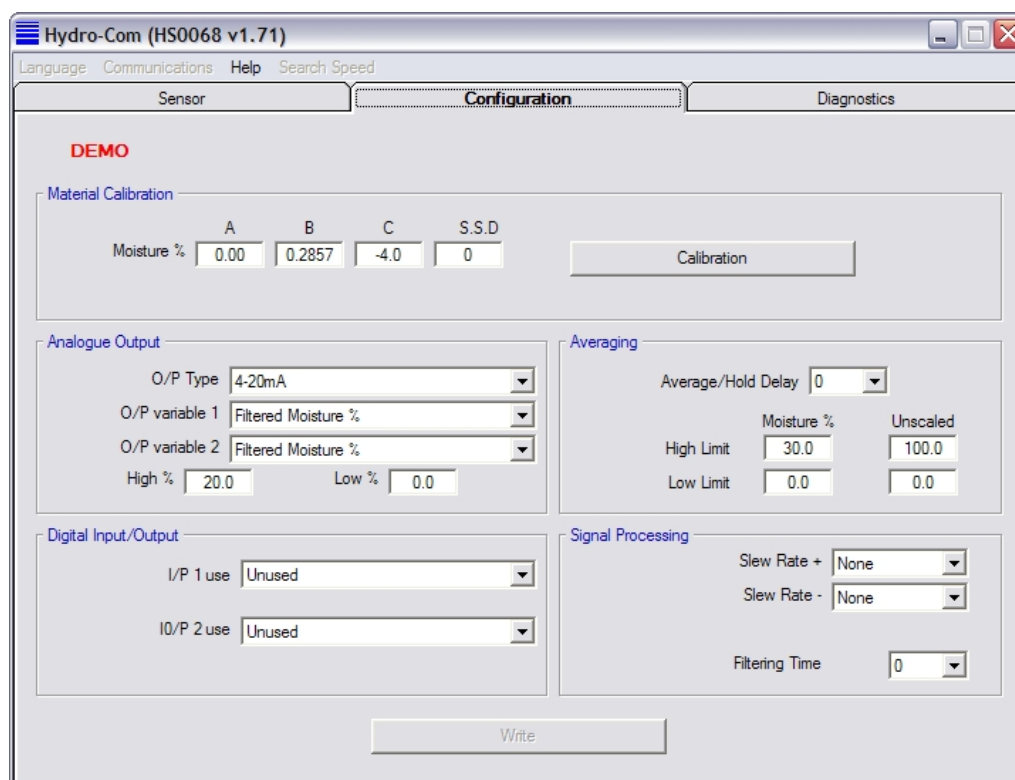


Figura 5.15 Captura del programa Hydro-Com, pestaña de configuración de salidas.

Una vez que los transmisores fueron configurados se procedió a realizarles una calibración tomando muestras de las masas de los tachos y se enviaron a laboratorio, con lo cual se ingresan los valores y se realiza un ajuste de curvas para la salida de cada transmisor como se observa en la figura 5.16.

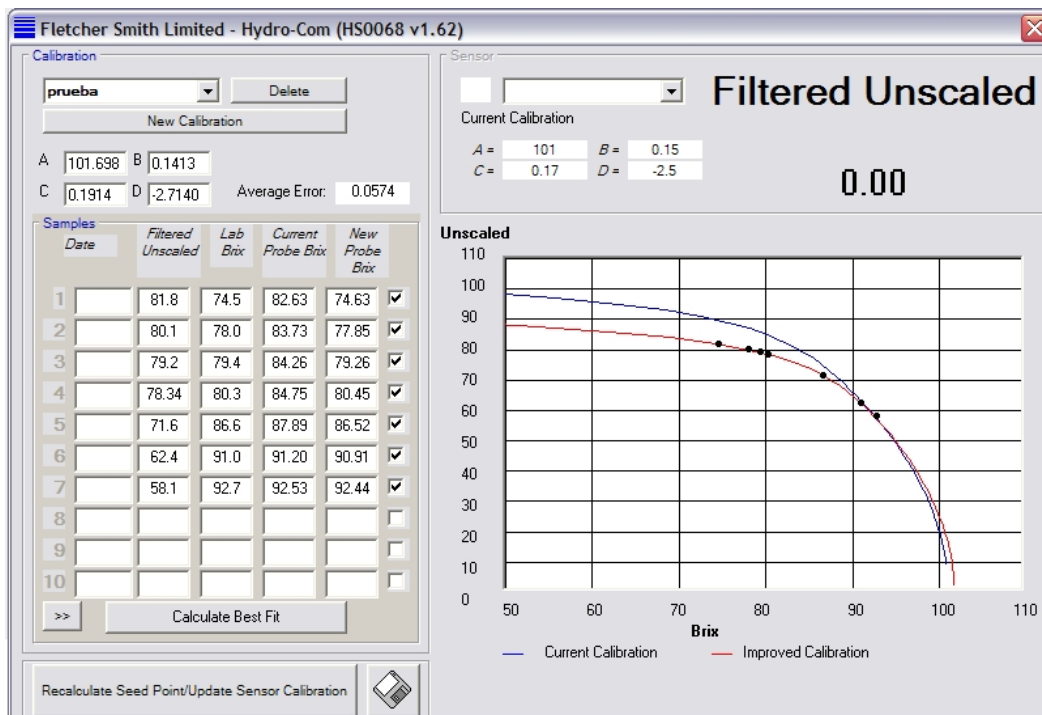


Figura 5.16 Captura del programa Hydro-Com, pestaña de calibración.

Una vez que se consiguió una medición real y confiable de °Brix se utilizó la pantalla de monitoreo de las salidas de los transmisores para que los tacheros fueran ganándole confianza a la medición electrónica como se muestra en la figura 5.17.

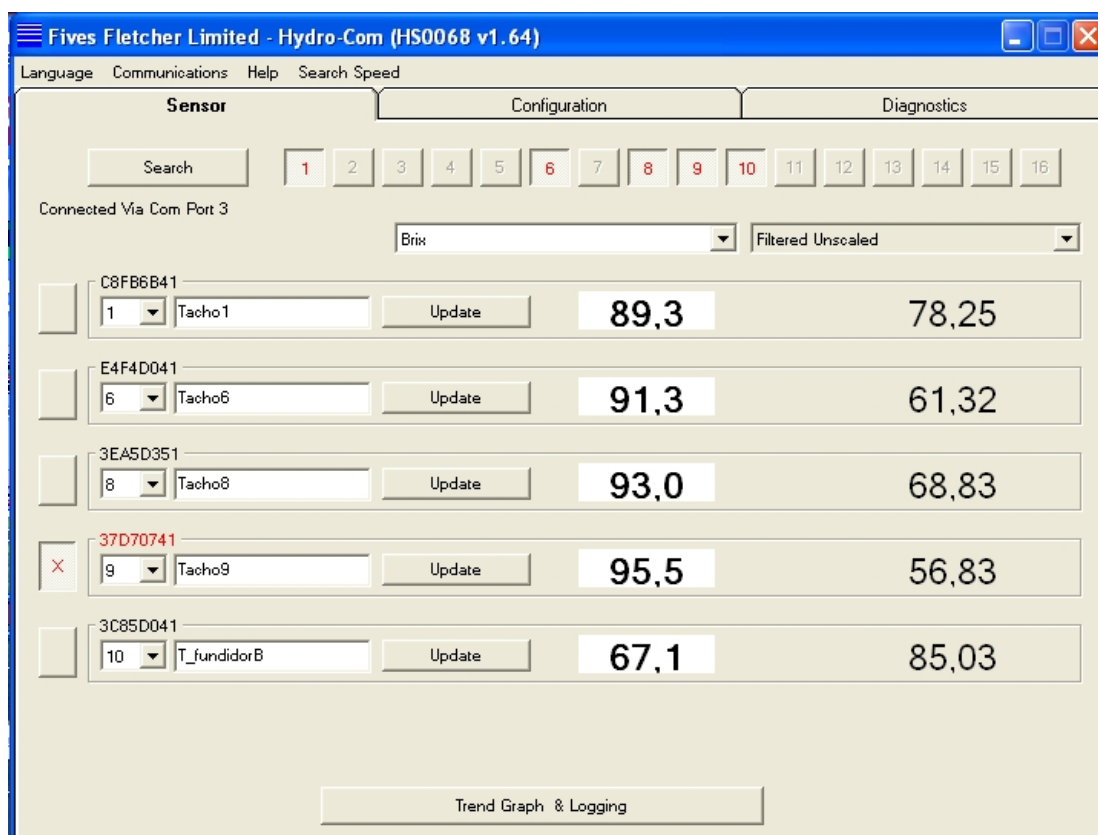


Figura 5.17 Captura del programa Hydro-Com, pantalla de monitoreo.

5.3.2 Configurador y Programador CONF600 ^[5]

Este programa propio de SMAR se utiliza para configurar y programar el controlador digital CD600 Plus, se basa en una programación de parametrización de bloques en los cuales hay que interconectar lógicamente los módulos para obtener la funcionalidad deseada.

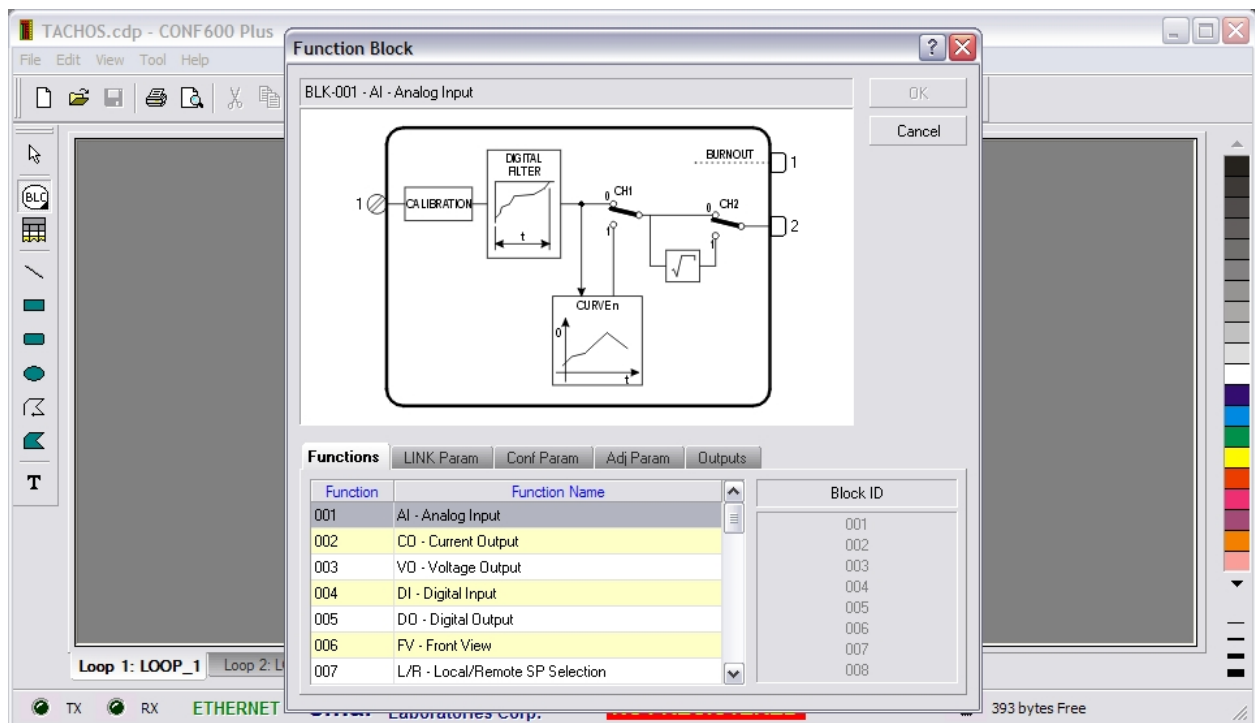


Figura 5.17 Captura del programa Conf600, escogencia de bloques.

5.3.3 Servidor OPC TagList600 ^[5]

Este software se encarga de entablar la comunicación por medio de la interfaz Ethernet utilizando el protocolo TCP/IP, su función principal es virtualizar un servidor OPC dentro de la computadora donde se instala, en el que carga todas las variables del proceso comúnmente llamadas TAGS, por lo tanto hace posible que el programa SCADA se comuniquen con el controlador.

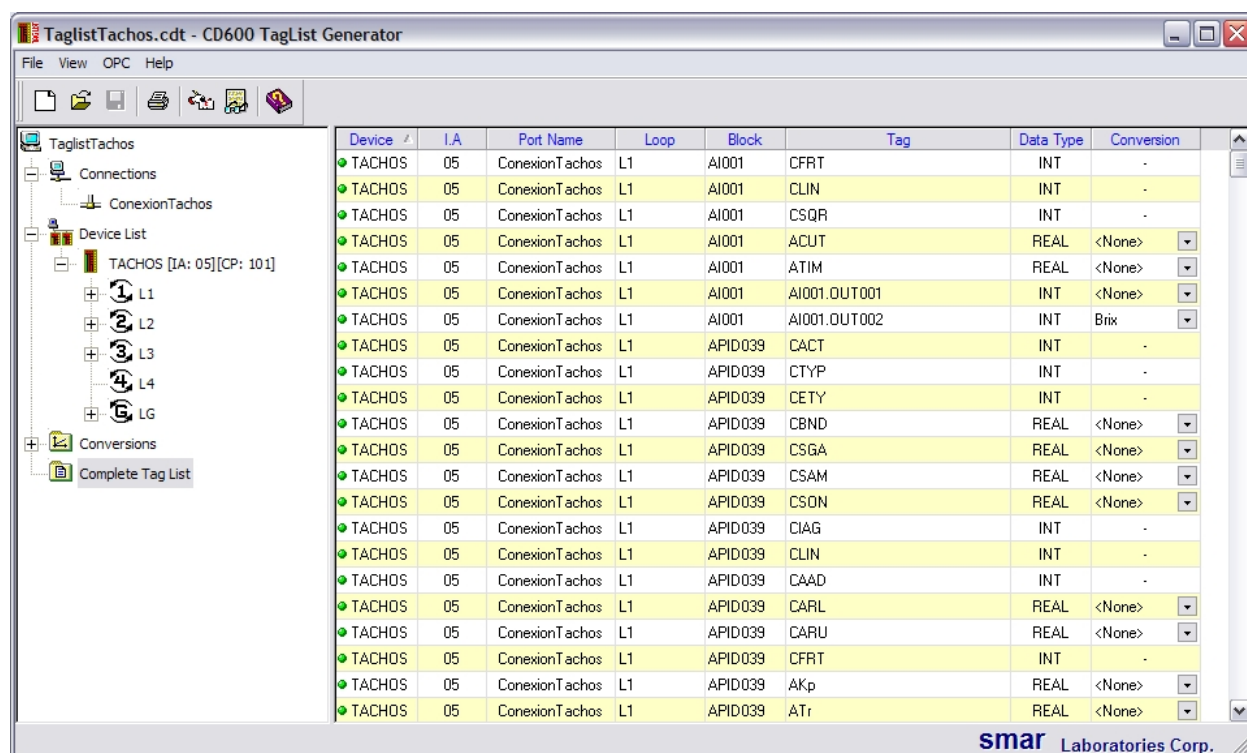


Figura 5.18 Captura del programa TagList600, servidor OPC.

5.3.4 INDUSOFT Web Studio

El programa Indusoft está orientado a la automatización industrial, cuenta con un amplio conjunto de herramientas de adquisición y despliegue de datos, así como objetos gráficos y animaciones, drivers para comunicación y la facilidad de un cliente OPC.

El Cliente OPC se comunica con la base de datos creada por el TagList600 realizando una asignación de variables de registros propia del programa (Tags) hacia los tags que se cargaron al servidor OPC desde el controlador como se aprecia en la figura 5.19.

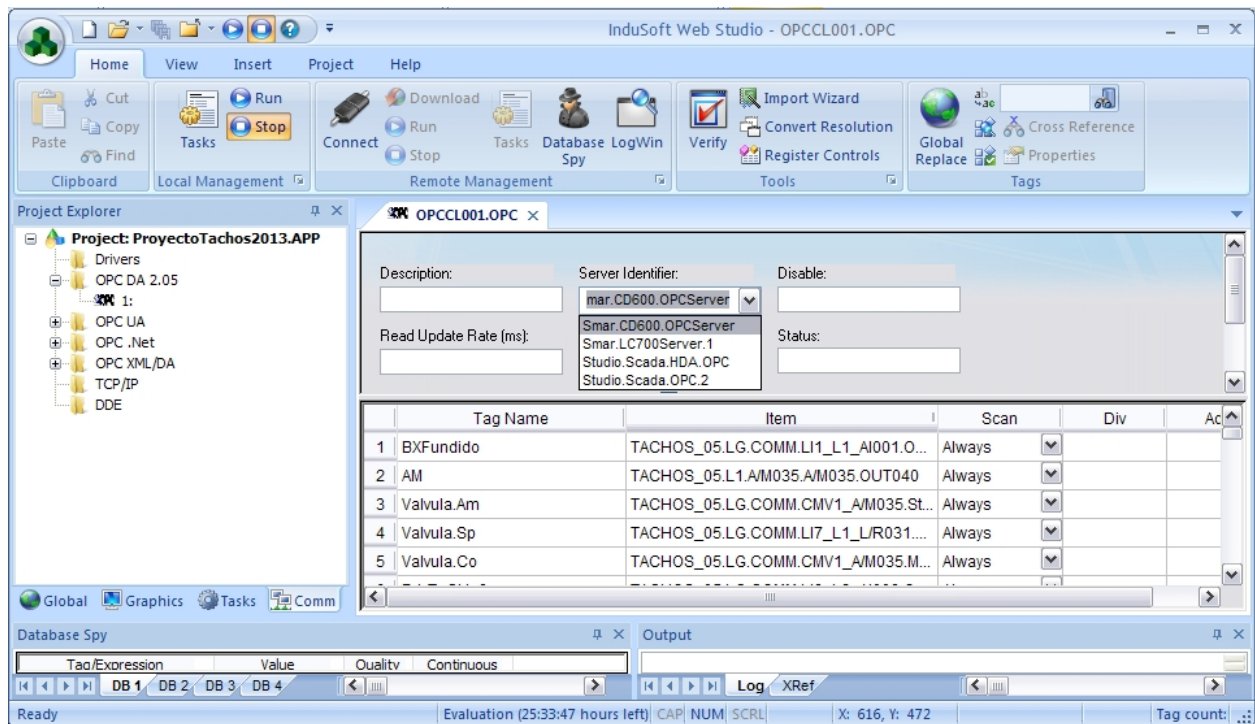


Figura 5.19 Captura del programa InduSoft, Cliente OPC.

Al configurar la comunicación entre el controlador y el programa, se diseñan las pantallas de monitoreo y de control, dibujando algunos de los elementos y también, utilizando símbolos ya preestablecidos.

La figura 5.20 muestra la pantalla principal donde se pueden monitorear las variables de los tachos.

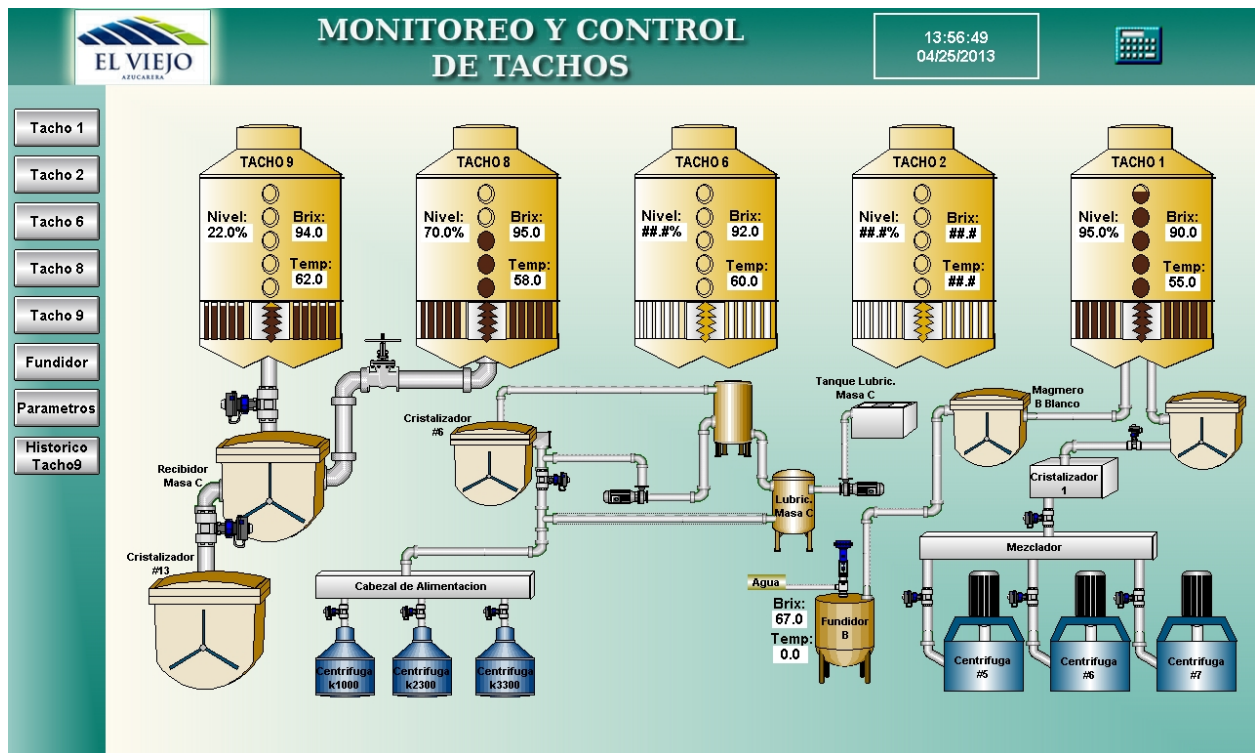


Figura 5.20 Captura de la pantalla principal de monitoreo.

La figura anterior contempla el monitoreo de los tachos #9, #8, #6, #1 y del tanque fundidor de magma, además de la adición futura del tacho #2.

En las siguientes figuras de la 5.21 a la 5.25 se muestran las distintas pantallas de monitoreo de los tachos.

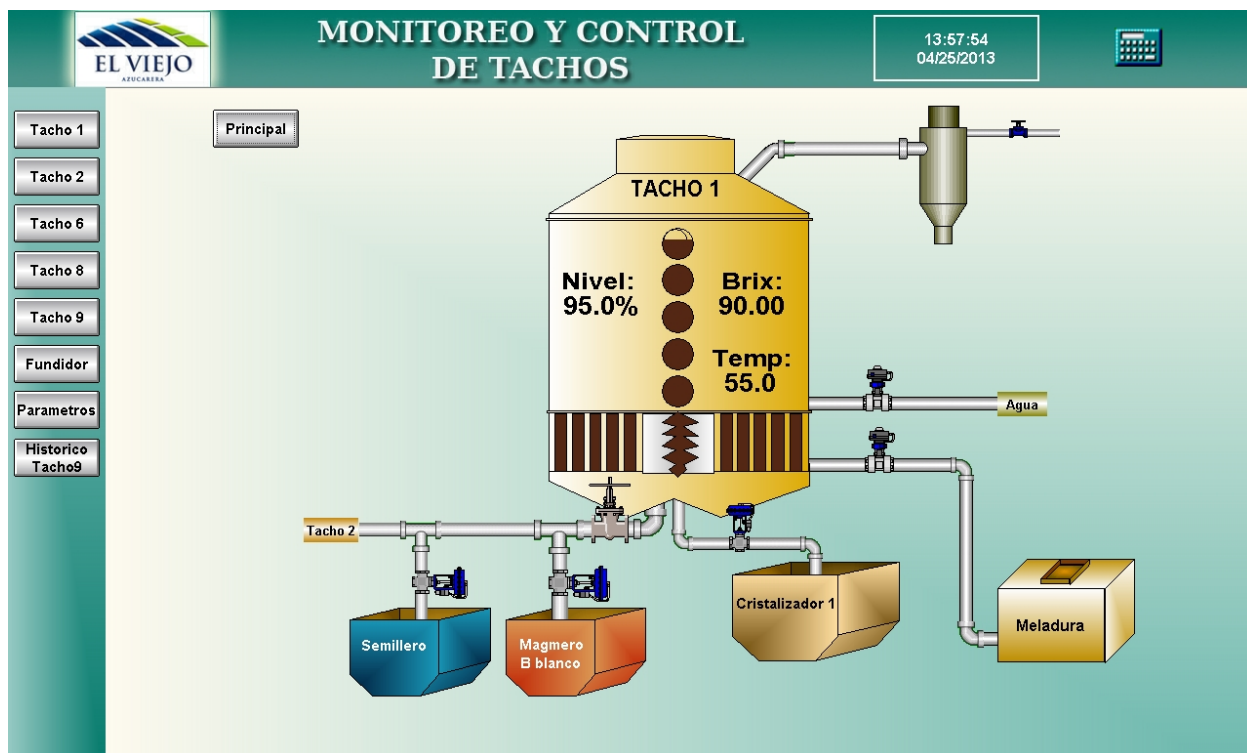


Figura 5.21 Captura de la pantalla de monitoreo del tacho 1.

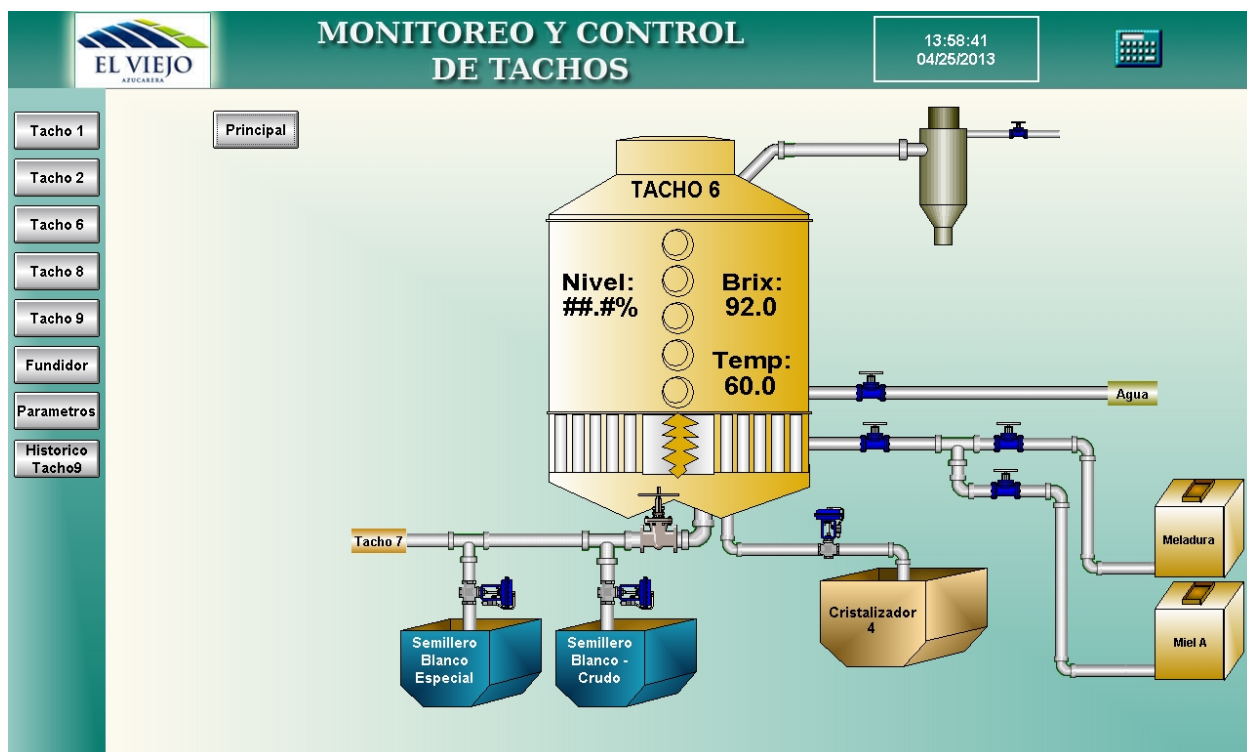


Figura 5.22 Captura de la pantalla de monitoreo del tacho 6.

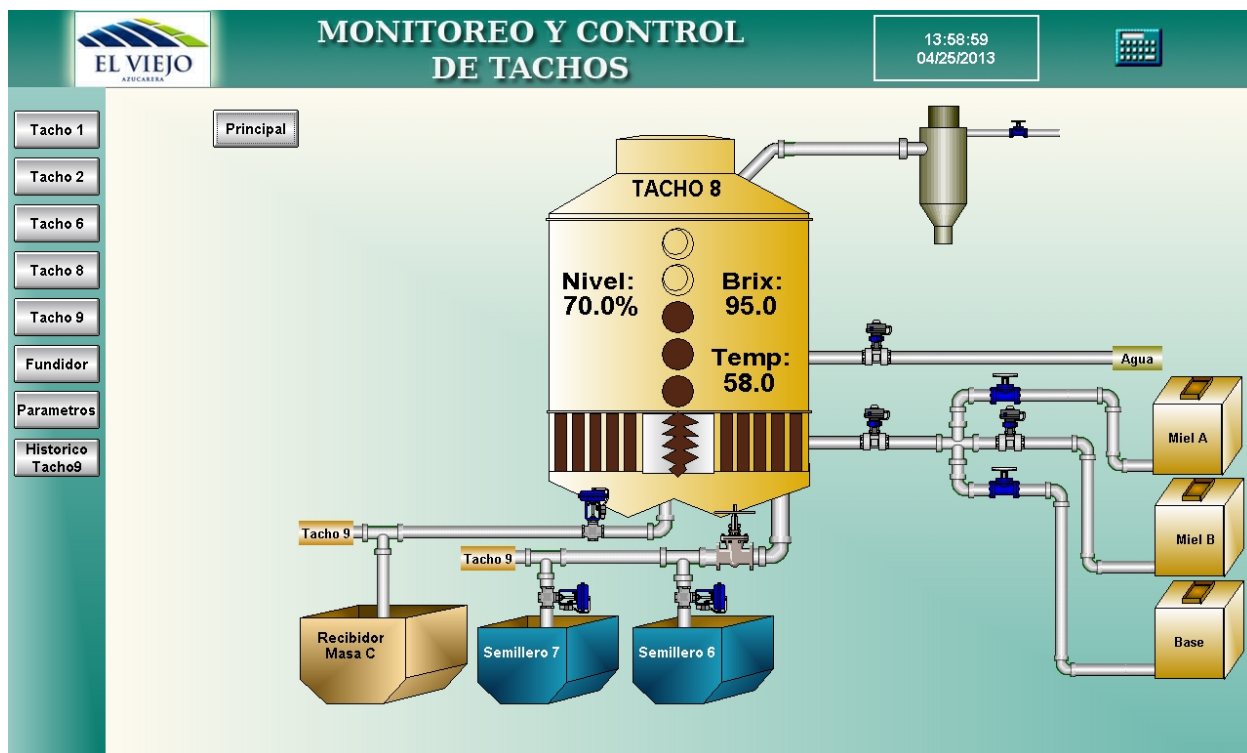


Figura 5.23 Captura de la pantalla de monitoreo del tacho 8.

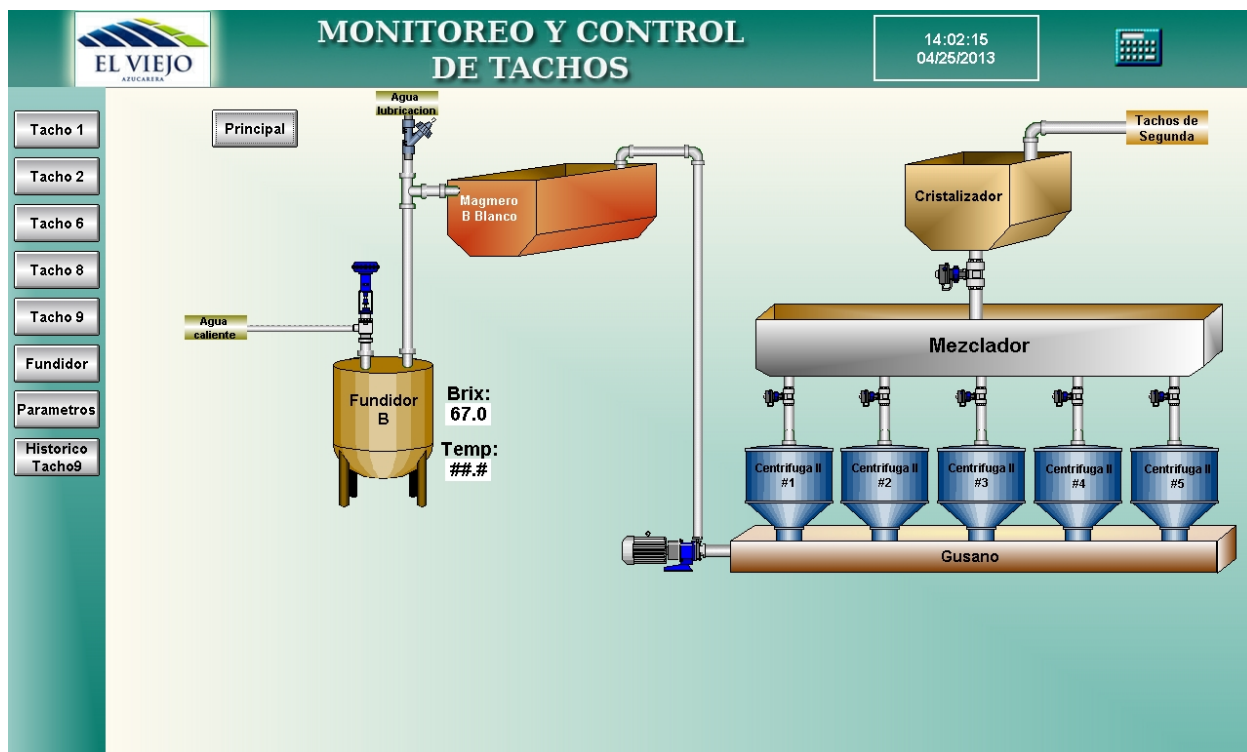


Figura 5.24 Captura de la pantalla de monitoreo del tanque fundidor.

La figura 5.25 muestra la pantalla del tachó 9, la cual difiere de las anteriores porque el tachó 9 es el único al que se automatizó ya que es un tachó que solo se utiliza para la fabricación de masas de tercera. Tiene una pantalla donde se puede ver el estado actual del control y además, se pueden introducir parámetros para el control del proceso del tachó.

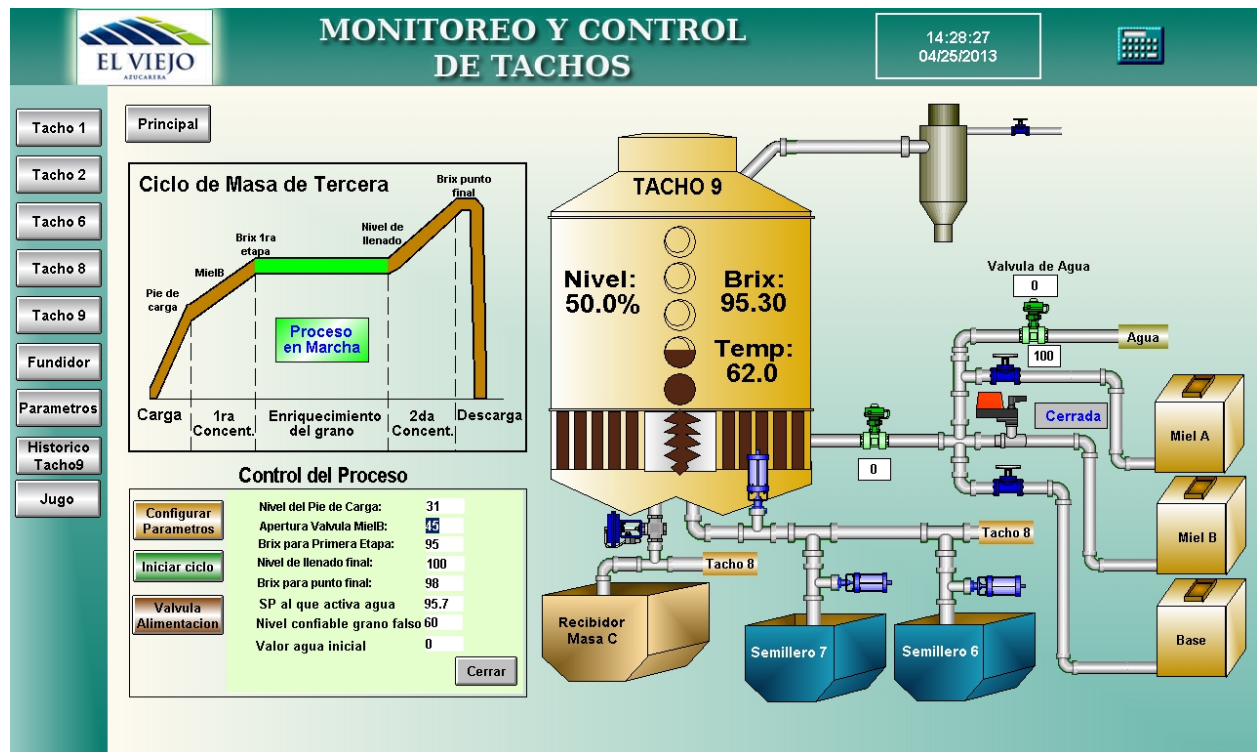


Figura 5.25 Captura de la pantalla de monitoreo y control del tachó 9.

5.3.5 Rutina de Control

El control implementado en el monitoreo y automatización de los tachos se basó en el uso de los bloques del controlador CD600 Plus, los cuales tienen funcionalidades muy robustas. Se requirió de un lazo de control para la lectura y manipulación de las variables, controlar la válvula de alimentación de miel y controlar la válvula neumática del agua. El diagrama de flujo mostrado en la figura 5.26 explica el principio de operación de la rutina de control.

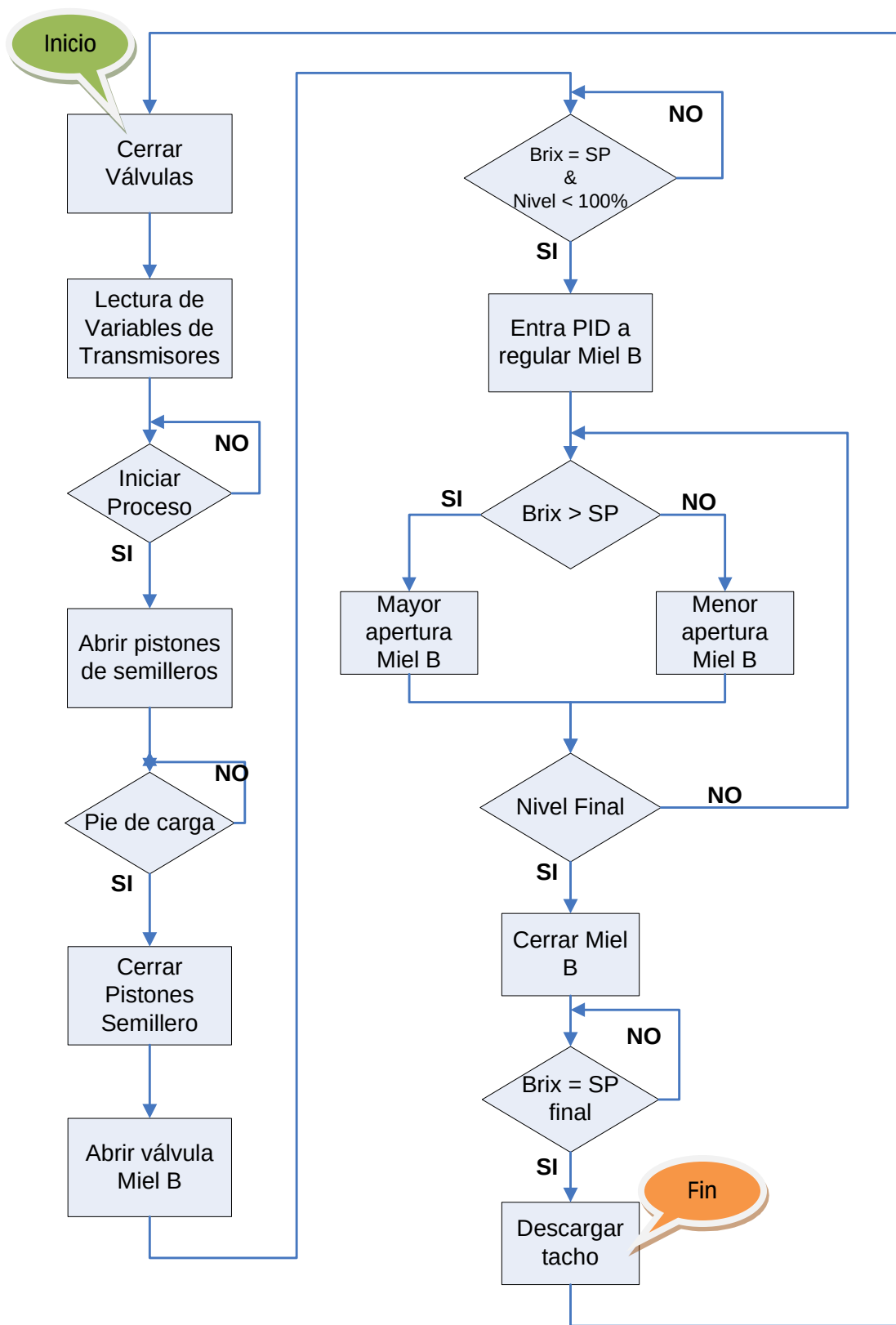


Figura 5.26 Diagrama de flujo del proceso de control del tacho #9.

por bloques de la rutina de control.

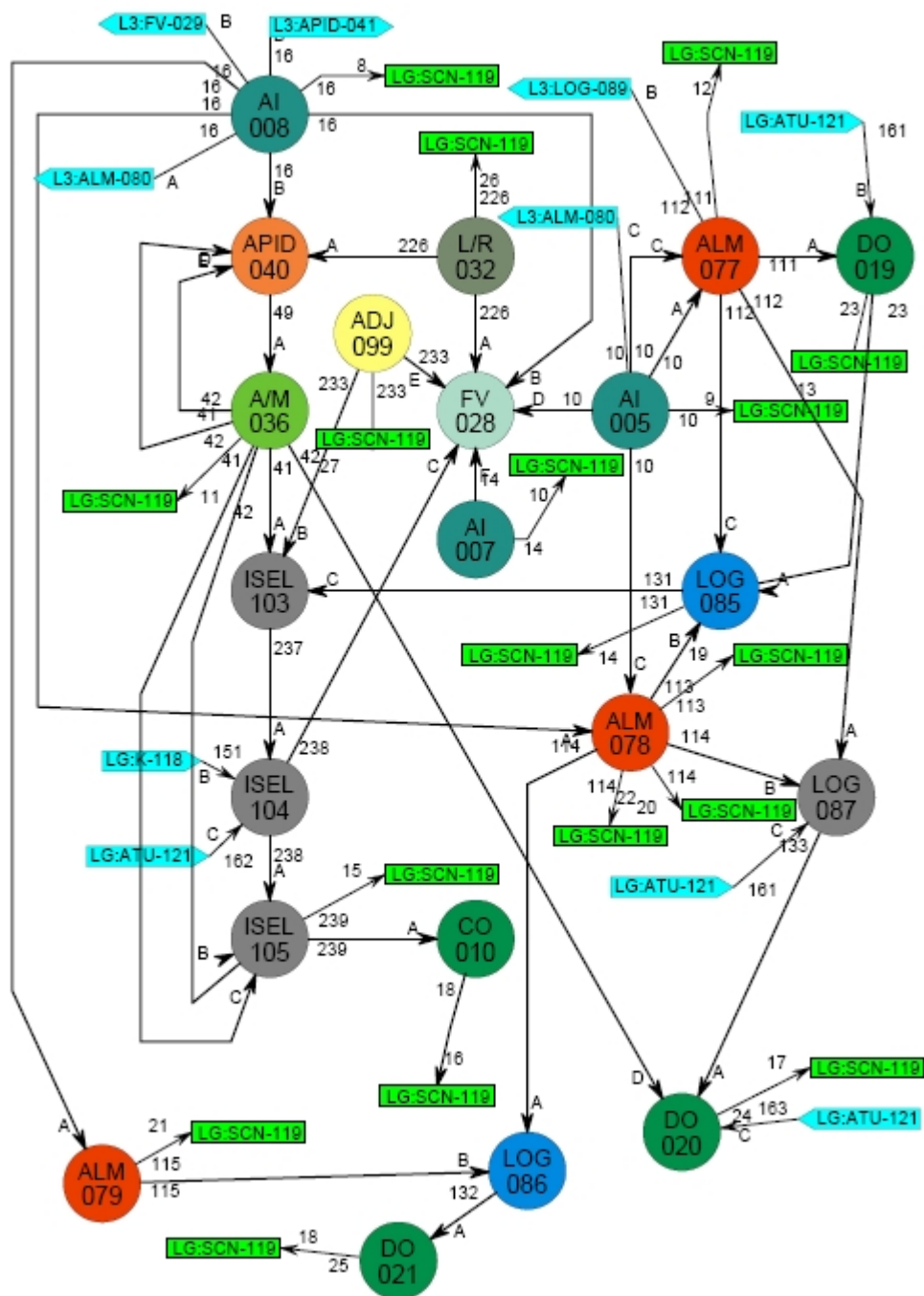


Figura 5.27 Control por bloques del tacho 9.

La lógica de control consistió en utilizar Bloques ALM para realizar comparaciones de las entradas de °Brix y nivel con los setpoint (SP) deseados, compuertas de lógica digital con los bloques LOG para la toma de decisiones, un bloque de controlador avanzado PID para el control automático de las válvulas tomando como retroalimentación las mediciones de los transmisores y como señal de referencia el SP deseado.

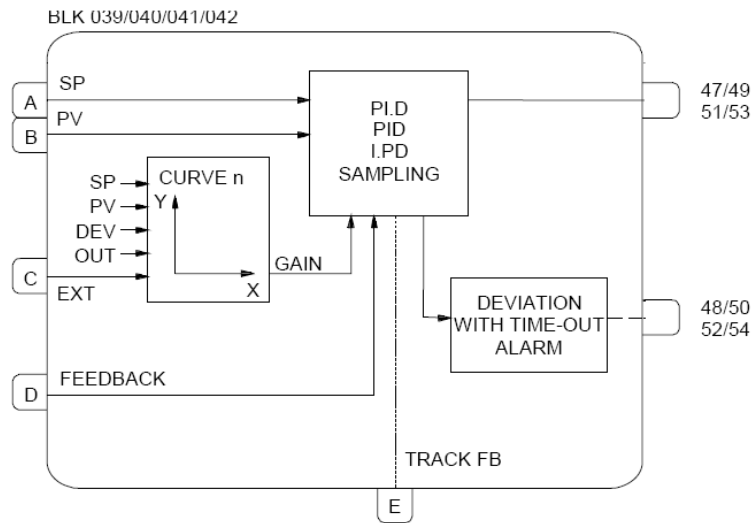


Figura 5.28 Controlador PID Avanzado. ^[5]

Capítulo 6: Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en la realización de este proyecto fueron muy satisfactorios para la empresa, hubo un cambio radical en la forma de producir cristalizaciones, desarrollos y masas tanto de primeras, segundas y de terceras.

Con la instalación de los transmisores de °Brix se rompió la brecha de años de incertidumbres hechas por mediciones a simple vista sin el apoyo de algún equipo electrónico. Anteriormente los tacheros debían estar vigilantes durante horas al proceso empleado en el tacho, donde contaban con visores de vidrio a lo alto del tacho para presenciar el nivel y la coloración de la masa, con lo que podían determinar la concentración de la misma, esta concentración también podía ser calculada tomando una muestra con una sonda en la base del tacho y palpando la textura de la masa para ver lo poco o muy densa que podía estar.

Esos métodos eran 100% rudimentarios y poco precisos, además de que no mostraban realmente el estado de cocción de las templeas.

Por lo tanto al instalar los transmisores de microondas empezó un proceso innovador en el que la tecnología cambiaría la forma de trabajar de los tacheros.

Una vez instalados y conectados los transmisores de °Brix se utilizó el software HydroCom para su configuración y calibración. Estos transmisores cuentan con 2 salidas de 4 a 20 mA, una de ellas fue configurada para la lectura de °Brix y la otra para la temperatura.

El receptor de microondas tiene como salida hacia el transmisor un “valor sin escala” el cual es utilizado para obtener un valor de °Brix utilizando la siguiente ecuación.

$$Brix = A - B.e^{C*us} + D * us^2 \quad (5.1)$$

Utilizando mediciones en línea con el sensor en el tacho y tomando una muestra al mismo material para su respectivo análisis de laboratorio, se realizó un cálculo como

el expresado en la figura 5.16, en los que se obtuvieron valores de mediciones de los transmisores muy cercanos o parecidos al valor de °Brix del laboratorio como se muestra en el Gráfico 6.1, estos valores fueron logrados por una ardua calibración de los transmisores para garantizar una credibilidad primordial en las mediciones del °Brix.

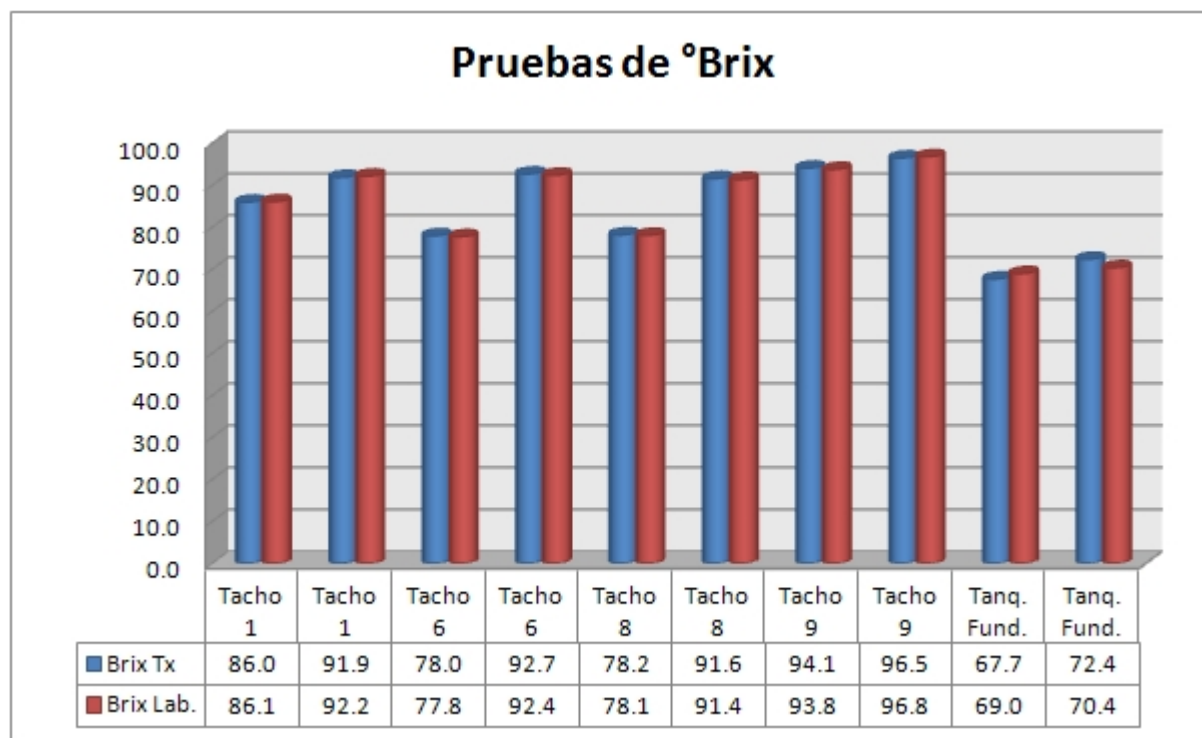


Figura 6.1 Pruebas de precisión del transmisor de °Brix.

En la tabla 2 se encuentran los parámetros de calibración de cada transmisor.

Tabla 2. Parámetros de calibración de los transmisores de microondas.

Transmisor	A	B	C	D
Tacho 9	104.0568	0.1451	0.1921	-2.625
Tacho 8	103.9544	0.1475	0.1499	-2.5522
Tacho 6	101.6984	0.1413	0.1914	-2.714
Tacho 1	104.9992	0.1361	0.1649	-2.468
Tanque Fund.	97.00	0.1492	0.1828	-2.50

En la figura 5.17 se observa la pantalla que proporciona el software HydroCom en la que se puede monitorear en tiempo real el estado de la concentración del material cocinado en los diferentes tachos.

Al contar con una lectura de °Brix confiable, los tacheros poco a poco fueron dejando las difíciles técnicas de probar la masa para comprobar la concentración para solamente fijarse en los valores del °Brix desde la pantalla de una computadora que se destino para tal fin.



Figura 6.2 Sonda del tacho para pruebas de concentración.

El cambio que se dio en la forma de trabajar en los tachos propició que se tuviera mayor control en los puntos de semillamiento, de cristalización y de descarga de las masas. Esto fue debido a que para realizar un semillamiento inicial para una cristalización se necesita agregar la semilla en un brix determinado por la pureza, el cual no puede ser muy arriba o muy debajo de ese punto porque se puede producir una formación de grano falso o que la masa no cristalice. Estos problemas llegaron a desaparecer con la puesta en marcha de la medición del °Brix.

Los transmisores de microondas fueron conectados a la computadora con el uso del puerto de comunicación RS485 propio de los sensores, pero esta utilidad se utilizaría solamente para realizar pruebas y calibraciones.

Posteriormente al instalar el gabinete de conexiones eléctricas, las señales provenientes de los transmisores de °Brix, temperatura y nivel, fueron conectados a los controladores por medio del protocolo industrial HART descrito con anterioridad. Al conectarlos como entradas a los controladores se pudieron monitorear directamente desde el programa CONF600 con el cual se programaron los controladores.

Conjuntamente con la programación del controlador se diseñaron las pantallas de INDUSOFT destinadas para el monitoreo y control, desarrollando las áreas gráficas y animaciones necesarias.

Al contar con las pantallas de monitoreo, el control programado, y las variables (TAGS) asignadas, se instaló el servidor OPC y se conectaron los controladores a la computadora por medio de la interfaz Ethernet haciendo una pequeña red interna en el área de tachos, con lo que dio inicio el monitoreo de los mismos.

La figura 6.3 muestra una de las primeras gráficas obtenidas de una masa de tercera desde el tacho 9, esta gráfica muestra el nivel del tacho en color rojo y la concentración de la masa en color azul, observándose la falta de uniformidad tanto en la alimentación de la miel y también en la elevación del punto de concentración.

Cabe mencionar que el proceso representado en la figura 6.3 fue realizado por un tachero de la forma que normalmente se utilizaba en el ingenio, agregando Miel B y concentrando la masa utilizando el criterio del ojo clínico y de la textura de la masa, haciendo que el proceso fuera de una forma poco uniforme, teniendo mucha inestabilidad en la concentración, ya que, al agregar mucha miel la concentración baja y al agregar poca miel y teniendo mucho vapor, la concentración tiende a subir rápidamente, pudiendo presentarse una formación de grano falso que consiste en la aparición de micro granos que absorben sacarosa pero que no se desarrollan lo suficiente para ser retenidos en las centrifugas para continuar el proceso de

crecimiento sino que son drenados y se mezclan con la miel por lo que se producen considerables pérdidas de azúcar que se escapan en las mieles finales.

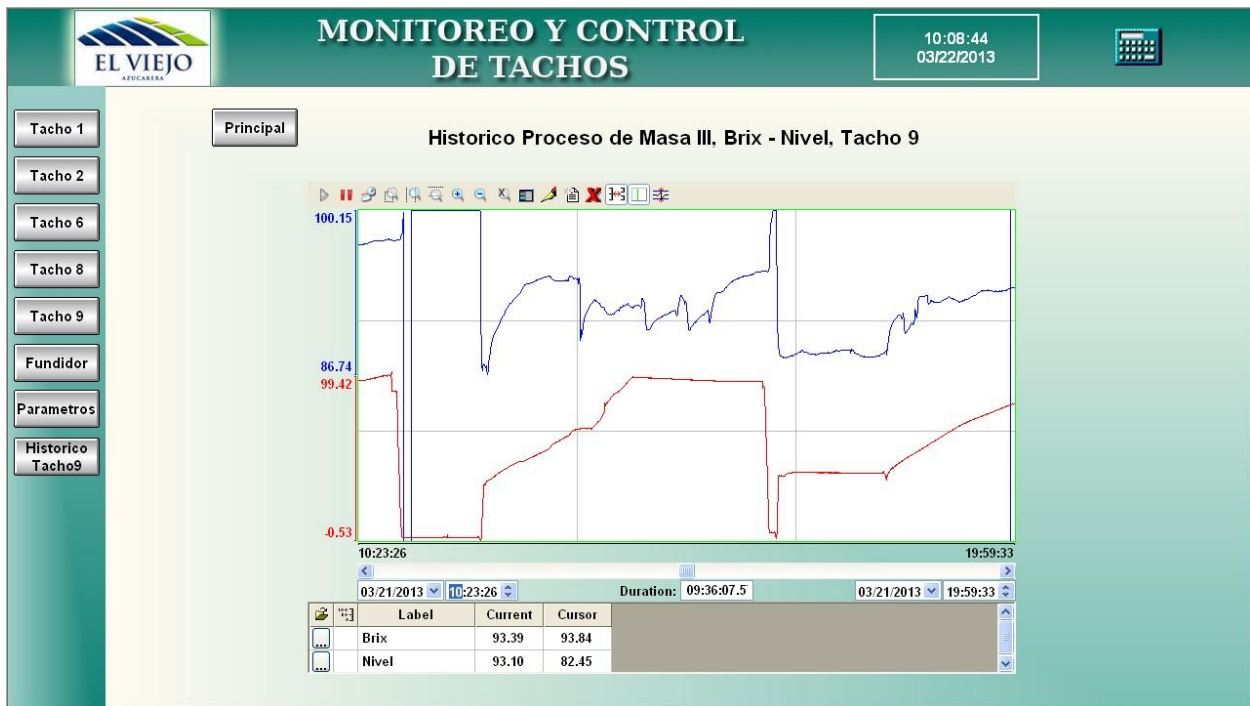


Figura 6.3 Gráfica de una masa cocida de tercera.

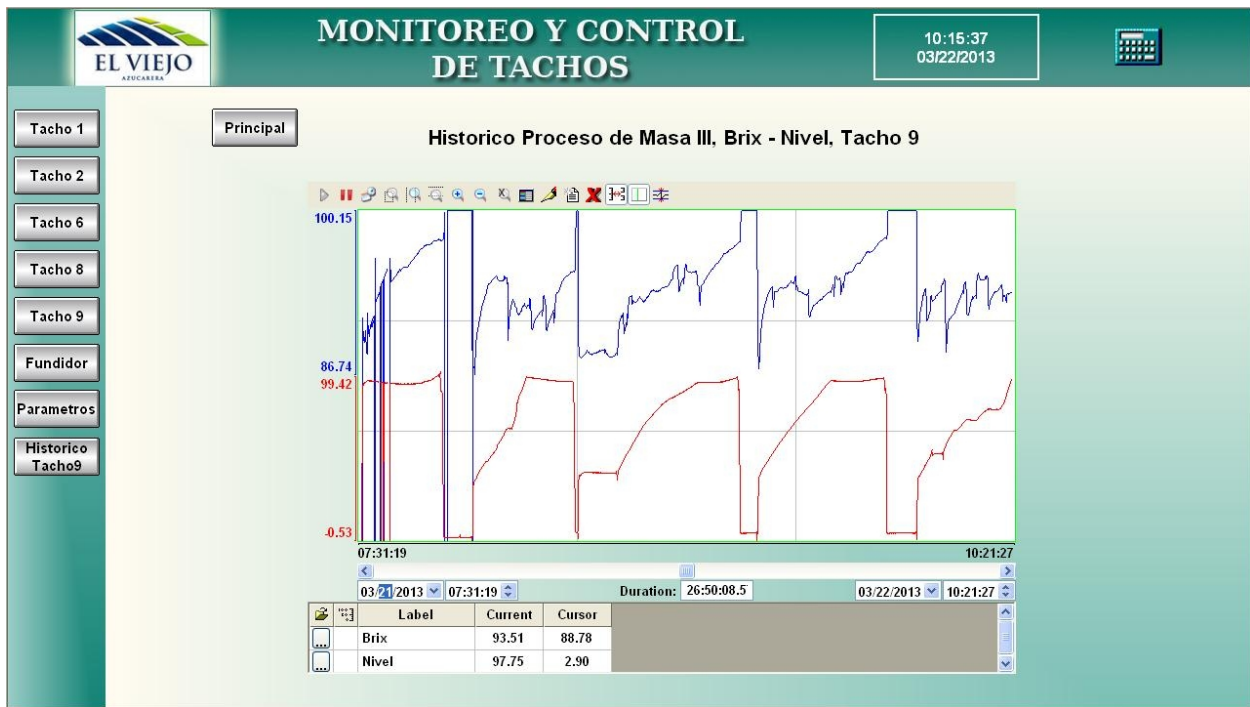


Figura 6.4 Gráficas de masas de tercera manuales.

El grave problema de falta de uniformidad en la obtención de masas se puede observar en la figura 6.4 donde fácilmente se nota la marcada diferencia entre la forma de todas las masas.

Mientras se elaboraron masas de tercera se trataron de graficar para poder analizar y copiar la receta. Esta receta es mostrada en una grafica lineal en la figura 6.5.

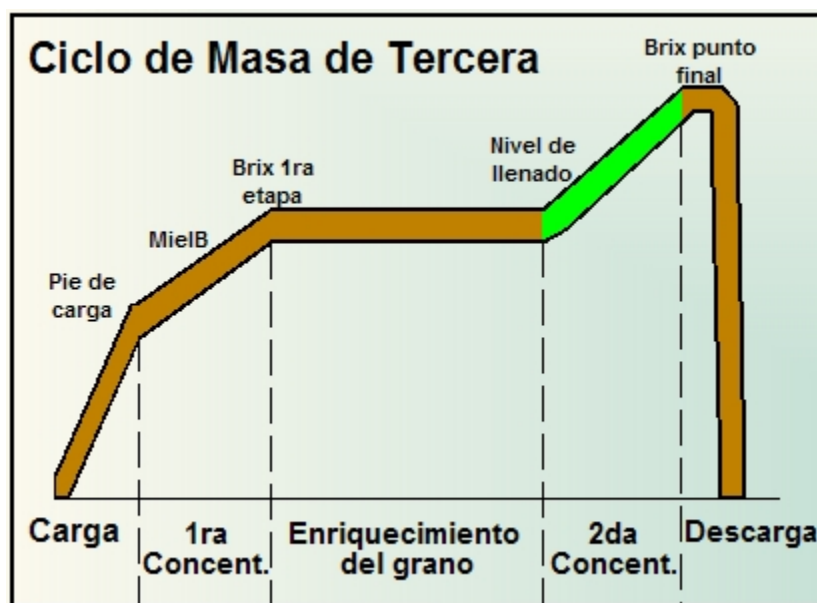


Figura 6.5 Representación del proceso de cocción de masa de tercera.

En la figura 5.25 se encuentra la pantalla para controlar el tachó 9, donde están representadas las válvulas de Miel B, Agua y de alimentación hacia el tachó, los tanques de agua, miel B y base de cristalización (que en una nueva etapa se piensan medir los niveles) y los tanques semilleros donde se guardan los desarrollos de las cristalizadas producidas por el tachó 8. Cabe mencionar que el tachó 9 puede ser utilizado para cristalizar, desarrollar y cocinar masas de tercera, pero por motivos de eficiencia sólo realiza procesos de cocción de las masas.

Como se observa en la figura 6.5, el proceso de masa consistió en cargar desde el semillero (semillero 7 de la figura 5.25) el pie de carga con cristales formados, normalmente este pie de carga representa el 33% del volumen del tachó.

Para realizar esta carga el usuario debía de darle inicio al sistema desde la pantalla de control mostrada en la figura 6.6 luego de ingresar los parámetros de control con los cuales operaría el controlador digital.

The screenshot shows a software interface titled "Control del Proceso". On the left side, there are three buttons: "Configurar Parametros" (highlighted in orange), "Iniciar ciclo" (green), and "Valvula Alimentacion" (brown). The main area on the right is a light green box containing a list of parameters, each with a label and a numerical value in a white input field. The parameters are: "Nivel del Pie de Carga: 33", "Apertura Valvula MielB: 45", "Brix para Primera Etapa: 93", "Nivel de llenado final: 100", "Brix para punto final: 98", "SP al que activa agua 93.7", "Nivel confiable grano falso 60", and "Valor agua inicial 0". A "Cerrar" button is located at the bottom right of the parameter list.

Parameter	Value
Nivel del Pie de Carga:	33
Apertura Valvula MielB:	45
Brix para Primera Etapa:	93
Nivel de llenado final:	100
Brix para punto final:	98
SP al que activa agua	93.7
Nivel confiable grano falso	60
Valor agua inicial	0

Figura 6.6 Pantalla para ingresar los parámetros de control.

Cuando el tachó alcanza el nivel del pie de carga automáticamente cierra los pistones de los semilleros, el tachero debía de abrir manualmente la alimentación de vapor (figura 6.7) para concentrar la masa mientras que automáticamente se regulaba la alimentación de la miel B al valor porcentual ingresado desde el control de la figura 6.6 hasta lograr llegar al punto deseado de °Brix para la primera etapa de control (SP).

En esa primera etapa de concentración no se podía producir una concentración acelerada o con un punto de brix por encima del valor deseado debido a la posible formación de grano falso. Por ese motivo existía un control adicional implementado en un lazo extra para manipular una válvula posicionada para lograr regular o bajar la concentración de la masa adicionándole agua (Figura 6.8).



Figura 6.9 Válvula mecánica para alimentar vapor.

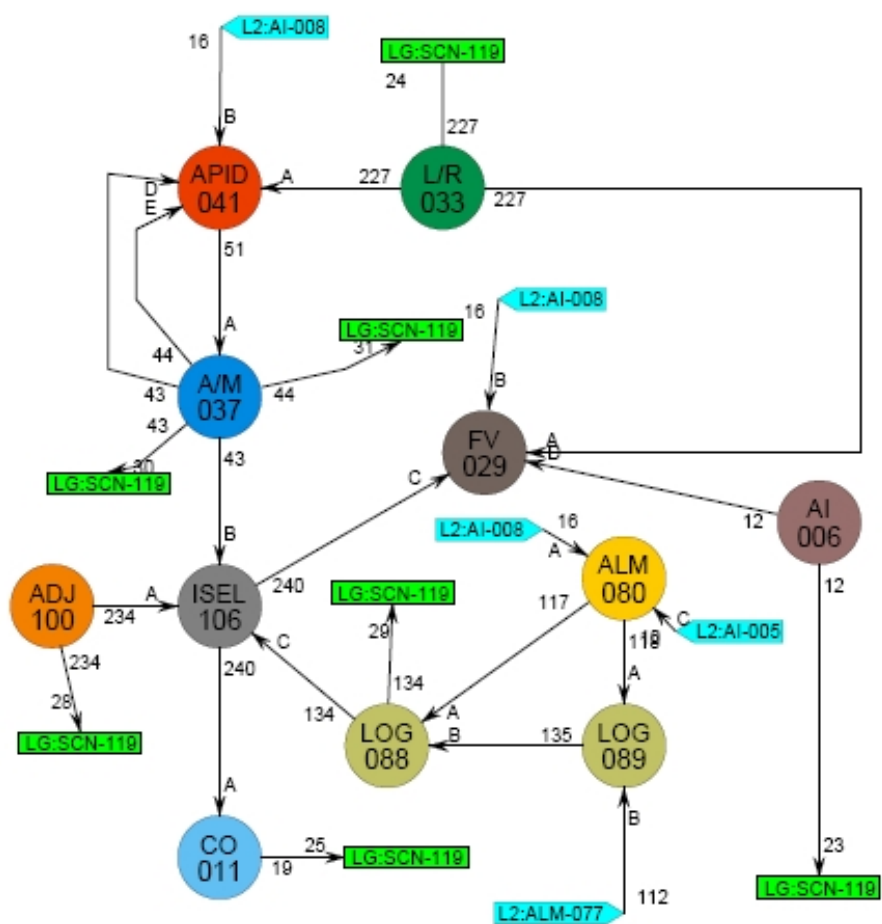


Figura 6.8 Control para la válvula de agua.

Durante ese proceso el control actuaba de forma digital sin PID, cuando el proceso alcanzaba el °Brix deseado para la primera etapa entraba el PID a regular de forma automática la válvula de alimentación de Miel B para mantener un °Brix constante hasta que el tacho alcanzara su nivel de llenado máximo o programado.

Cuando se alcanzaba el nivel programado se cerraban todas las válvulas y se dejaba concentrar la masa hasta alcanzar el nivel de °Brix final deseado donde el ciclo de cocción concluía y se mostraban señales visuales en la pantalla de control y monitoreo, para luego proceder a cerrar el vapor y a descargar el tacho.

En la figura 6.9 se muestra una grafica obtenida de un proceso automático, en esta grafica se puede observar el cambio de un proceso manual a uno controlado electrónicamente. La agregación de miel al tacho es de forma continua y uniforme sin grandes cambios que afecten gravemente la concentración lo que colabora a que el °Brix sea muy estable y que vaya concentrándose la masa de forma controlada.

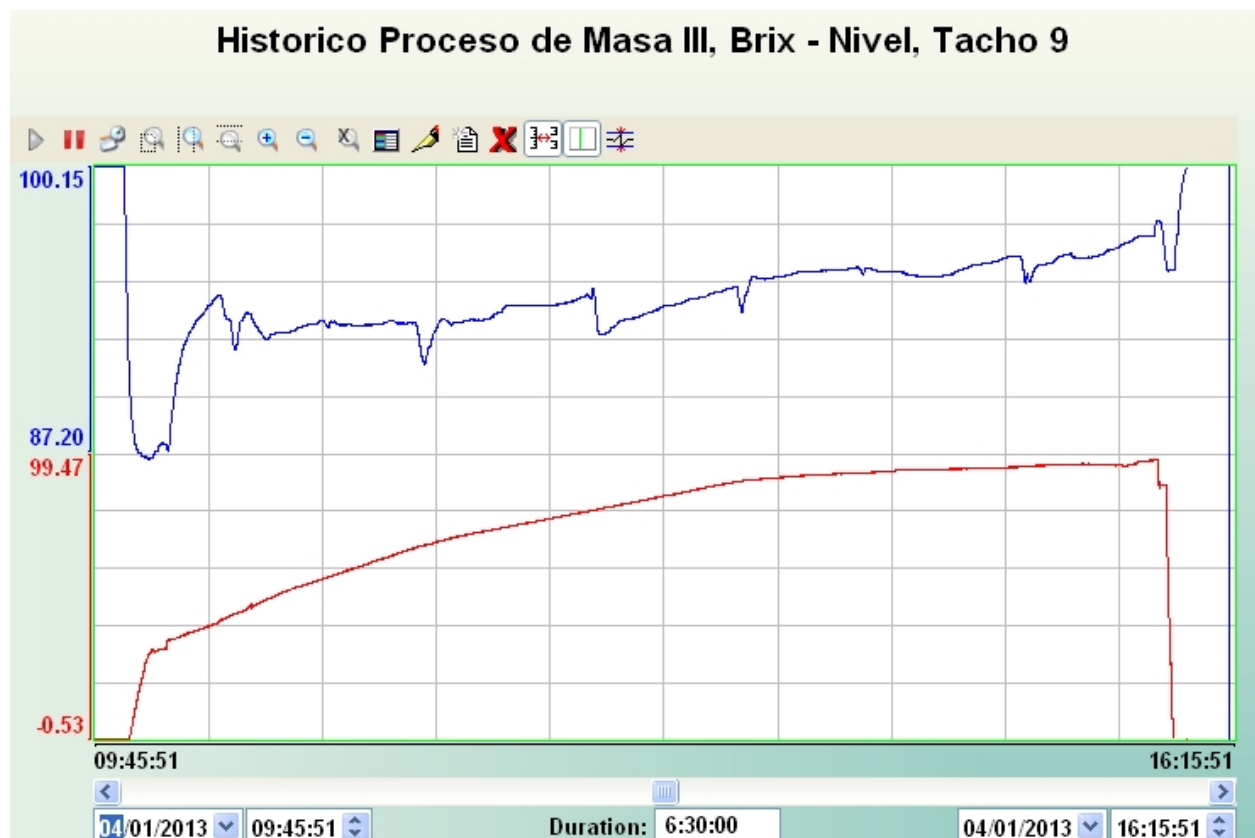


Figura 6.9 Gráfica de una masa obtenida automáticamente.

En la grafica anterior se observa un proceso sumamente constante donde se puede presenciar un llenado del tacho parejo y suavizado, sin grandes fluctuaciones de mieles y con una concentración que inicia en los 87 °Brix y que concluye en 98 °Brix sin cambios bruscos en el medio, lo que impide que se formen granos falsos y que además, propicia una mayor absorción de sacarosa por parte de los cristales lo que se ve reflejado en la reducción de azúcar en la miel final llamado “Nutch”.

El nutch es la prueba de calidad que se realiza en el laboratorio luego de obtener cada masa, se toma una muestra de la masa y se comprime para obtener la miel final y el azúcar para ser procesada en las siguientes etapas de crecimiento del grano.

Dentro de la calidad esperada en la empresa, se espera que el nutch de la miel final esté por debajo de los 32 puntos de nutch idealmente, pero menos de 34 es una medición aceptable y más realista.

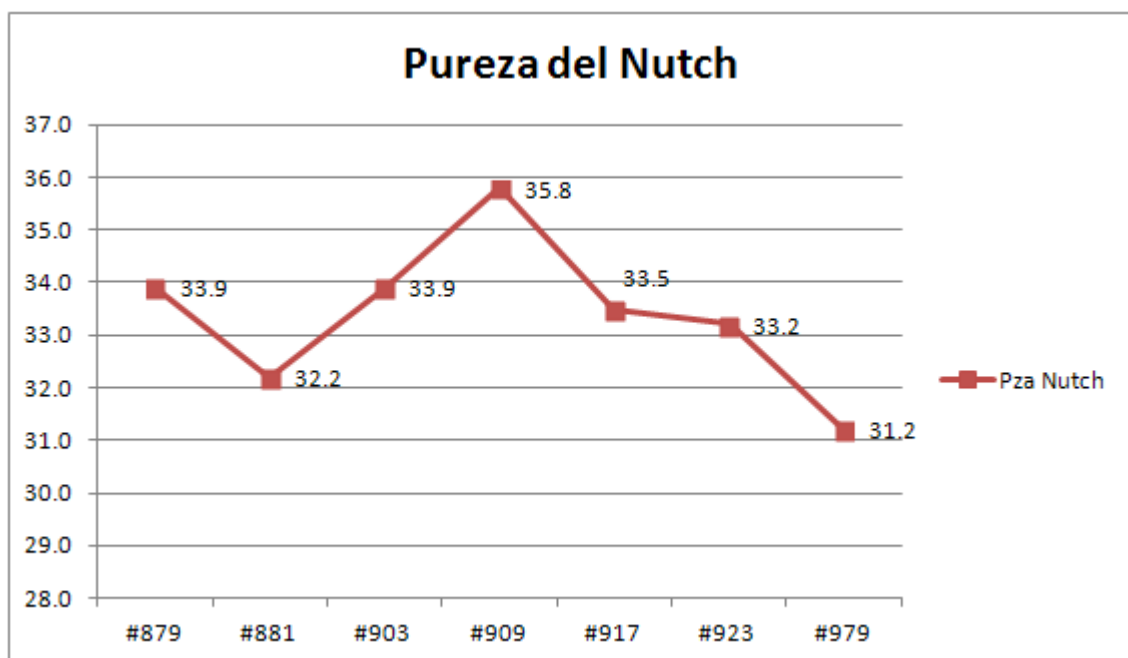


Figura 6.10 Gráfica de pruebas de calidad en las masas automáticas.

Como se puede observar en la figura 6.10 solamente una de las masas estuvo por encima de los 34 puntos del nutch con un valor de 35.8 en la masa # 909, efecto de un problema externo al sistema de control que fue ocasionado por presencia excesiva de lodos en la caña durante ese día, que hizo que las mieles redujeran su pureza y por consiguiente la calidad, con lo cual hubo formación de grano falso en exceso. A parte de esa masa todas las demás estuvieron con niveles muy bajos incluso alcanzando un 31.2, lo cual expresa la gran reducción de azúcar perdida en la miel final produciendo un aumento en la obtención de cristales, que son utilizados como semilla para la siguiente etapa, producción de masas de segunda y producción de masas de primera o azúcar comercial, incrementando la posible obtención del azúcar final.

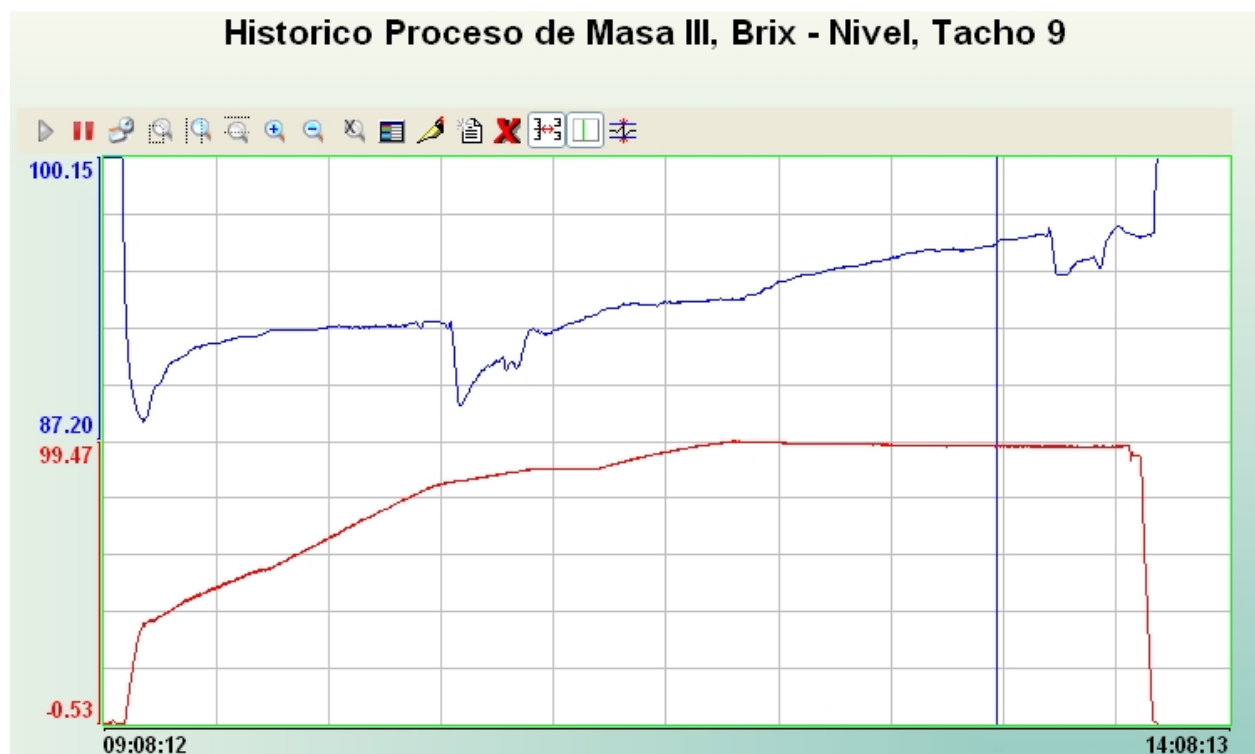


Figura 6.11 Gráfica de la masa automática #931.

En la figura 6.11 se puede observar otra de las masas obtenidas mediante la utilización del sistema de control automático en la que se observa una caída de concentración producida por una disminución en la presión de vapor, durante la caída

la alimentación de la miel disminuyó para lograr recuperar la concentración deseada por lo que se observa una reducción en la pendiente de la línea del nivel.

Este problema de presión de vapor es común en los tachos y afecta meramente su operación ya que como son tachos tipo “batch” cada vez que entra a operar un tacho disminuye el vapor de la línea principal lo que produce que el vapor de cada tacho disminuya alejándose de su punto de operación de 10 psi hasta caer en algunas ocasiones hasta a 1.5 a 2 psi, lo cual afectó masas como la representada en la figura 6.12, donde se aprecia que hubieron cambios repentinos de concentración pero que el controlador PID logra contener con los cambios en la alimentación de la miel lo que hace que la funcionalidad del controlador en general quede aprobada para continuar con su aplicación y mejoras para los demás tachos del ingenio.

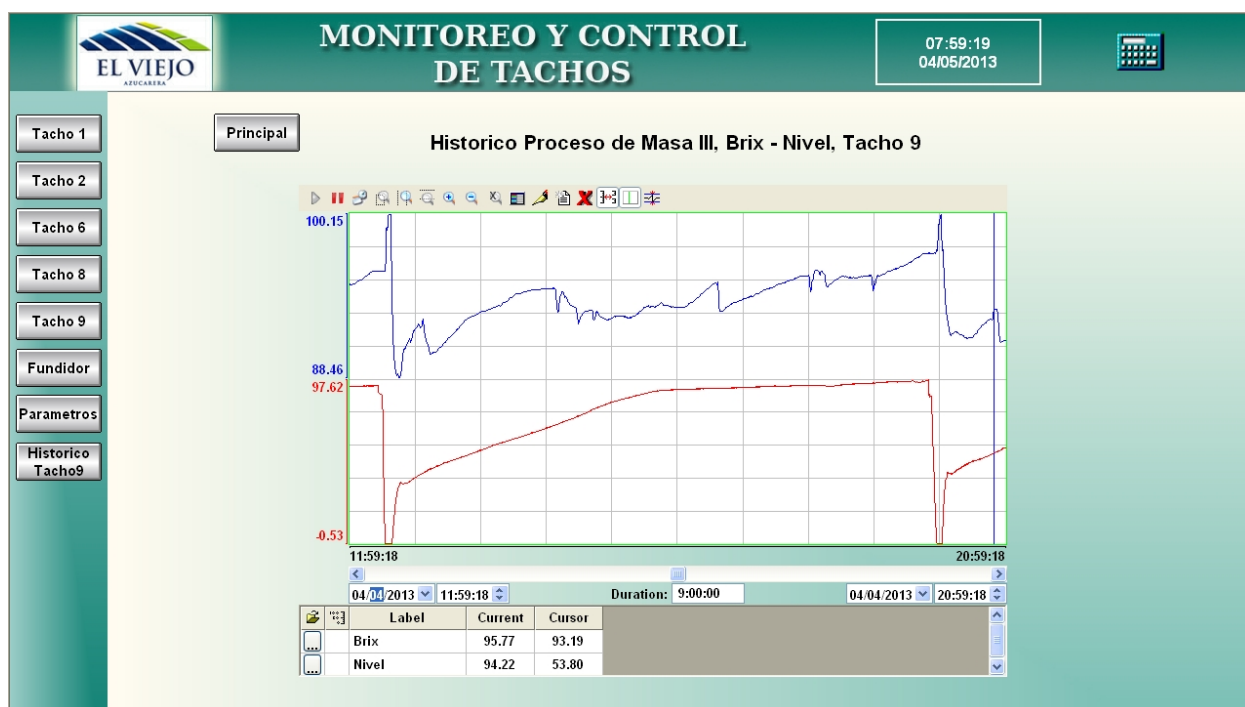


Figura 6.12 Gráfica de la masa automática #979 con problemas de vapor.

Además de los problemas generados por el vapor también se presentaron problemas en la alimentación de miel al tanque, ya que muchas veces había poca miel

y no alcanzaba para suplir la alimentación del tacho y había que parar durante algunas horas, o también, que existiera un exceso de miel lo cual obligaba a modificar los puntos de ajuste (SP) de la operación del tacho teniendo que volver el control a manual para realizar los ajustes de necesarios en la apertura de las válvulas para luego regresarlo a automático.

En la siguiente figura se puede observar una duración de aproximadamente tres horas en las que el tacho estuvo detenido con el pie de carga dentro del tacho esperando el suministro de miel B, se puede distinguir un nivel constante durante el tiempo en que el tacho estuvo en inactividad.

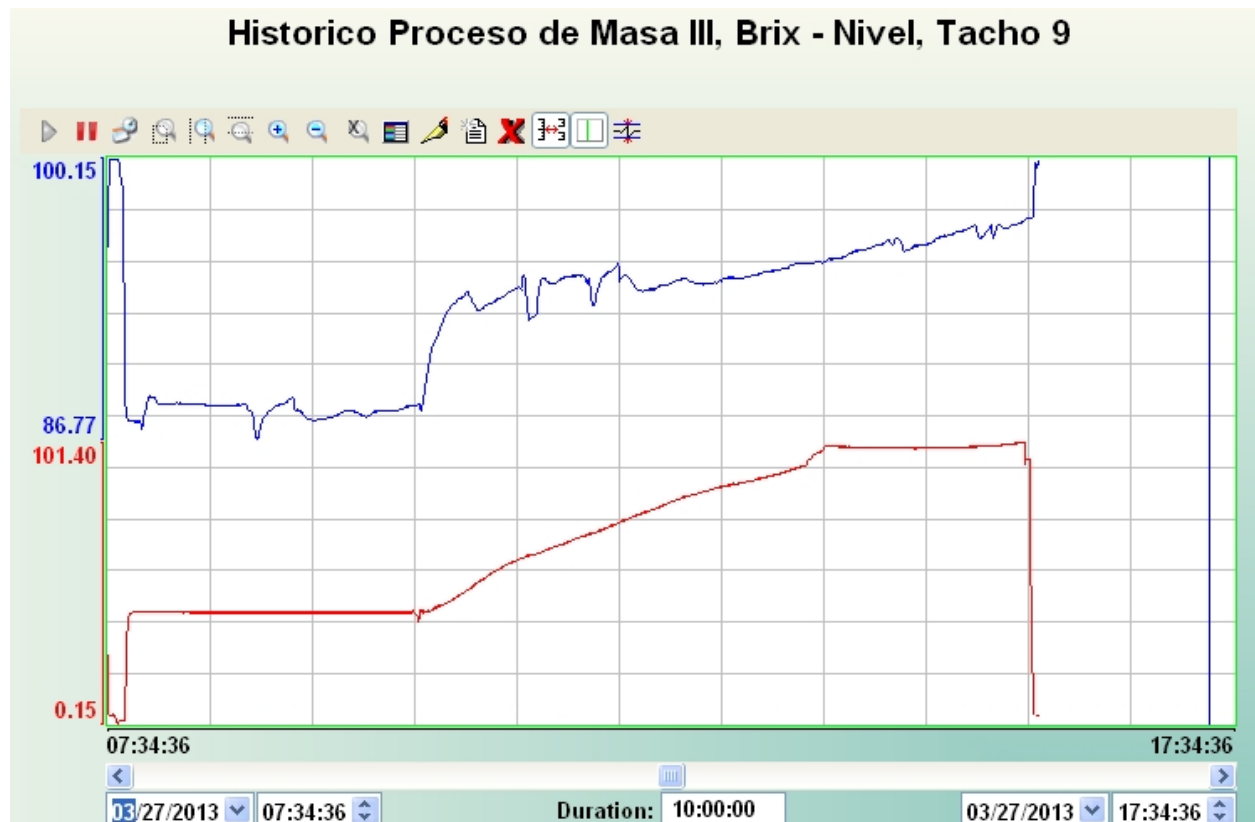


Figura 6.13 Gráfica que muestra el tiempo de inactividad del tacho.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se exponen las principales conclusiones obtenidas en la realización del proyecto y las recomendaciones para mejoras o implementaciones.

7.1 Conclusiones

1. La medición de °Brix por dispositivos electrónicos hizo que se mejoraran los procesos de obtención de cristales de azúcar al indicar el estado real de la concentración de las masas.
2. Los transmisores de presión diferencial permiten obtener mediciones de nivel en tanques cerrados como los tachos que son evaporadores de simple efecto, estos transmisores funcionan siempre y cuando no existan problemas de vacío variable que no afecte las mediciones de la presión.
3. La implementación de un servidor OPC hace posible que se puedan compartir datos en forma real, práctica y sencilla del proceso de automatización por medio de una red Ethernet sin la necesidad de emplear drivers adicionales.
4. Mediante el empleo del sistema automatizado de control se produjo una repetitividad en la obtención de masas de tercera con lo que se logra una estandarización en el proceso productivo.
5. Una fluctuación ascendente en la presión de vapor puede ocasionar que el grano de azúcar se funda mientras que una caída de presión puede ocasionar que el grano se diluya en el exceso de miel, por lo que una presión no constante afecta directamente la operación del sistema de control y consecuentemente la eficiencia del tacho.
6. Al controlar las variables del proceso de forma automática se logra un mayor aprovechamiento de la materia prima, por lo que se da un mayor agotamiento en las mieles produciendo mayor azúcar y reduciendo el Nutch.

7.2 Recomendaciones

- 1.** Los medidores de presión diferencial no pueden ser utilizados en cualquier proceso debido a que presentan un problema en la exactitud de la medición de nivel, debido a que son afectados por los cambios en la densidad del fluido y por la solidificación de las masas a mayor concentración.
- 2.** Para lograr una ampliación del sistema de control a los demás tachos es necesario el uso de un controlador con módulos de entradas/salidas adicionales como lo es el caso del controlador LC700, el cual no presenta limitaciones en la cantidad de transmisores que puede manejar debido a la gran capacidad de escalamiento de módulos que posee.
- 3.** Es necesario contar con relleno de vapor en el piso de tachos para evitar que la presión fluctúe, con lo que se lograría una mayor constancia en concentración de las masas.
- 4.** El ambiente en el piso de tachos es muy hostil debido a la elevada temperatura a la cual se cocinan las masas, por lo que es necesario construir un cuarto de control y monitoreo, en el que existan condiciones adecuadas para el correcto funcionamiento de computadoras y equipo de conexión de datos.
- 5.** En los últimos años el ingenio ha crecido en capacidad de procesamiento de la caña pero el piso de tachos ha quedado rezagado, por lo que es necesario que se amplíe la capacidad de los tanques de mieles, para obtener un suministro continuo y estable de miel, con lo que se lograría que el sistema de control opere continuamente.

Bibliografía

- [1] Azucarera El Viejo, S.A. **Procesos de Producción del Azúcar**. [En línea] Disponible en: <<http://www.elviejo.cr>>. [Última consulta enero de 2013]
- [2] Castro Mata, J. E. **Agotamiento de mieles provenientes de la caña de azúcar**. Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”. 1997. San Salvador, El Salvador. [Última consulta mayo 2013]
- [3] Chen, J. **Manual del Azúcar de Caña, para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados**. 2da edición. Editorial Limusa. 1999. México. [Última consulta marzo 2013]
- [4] Chou, C. **Handbook of Sugar Refining: A Manual for the Design and Operation of Sugar Refining Facilities**. 1ra edición. John Wiley & Sons Inc, 2000, Nueva York, Estados Unidos de América. [Última consulta enero 2013]
- [5] Controlador Digital CD600 Plus. [En línea]. Disponible en: <<http://www.smar.com/en/products/view.asp?id=162>>. Manual de Operación. SMAR. [Última consulta abril de 2013]
- [6] Díaz Bravo, T.; Domínguez Alonso, F. **Agotamiento de mieles en la industria azucarera**. Facultad de Ingenierías Química – Mecánica. Universidad de Matanzas, 2003. Matanzas, Cuba. [Última consulta mayo 2013]
- [7] Gillett, E. C. **Low grade sugar crystallization**. California & Hawaiian Sugar, 1948, Estados Unidos de América. [Última consulta mayo 2013]
- [8] Honig, P. **Principios de la tecnología azucarera**. Tomo I, Editorial Pueblo y Educación, 1979. La Habana, Cuba. [Última consulta mayo 2013]
- [9] Hugot, E. **Handbook of sugar cane engineering**. 3ra edición. Elsevier Science Publishers Inc. 1986. Amsterdam, Países Bajos. [Última consulta mayo de 2013]
- [10] Interfaz Ethernet ENET-710. [En línea]. Disponible en: <<http://www.smar.com/PDFs/Manuals/ENET710ME.pdf>>. Manual de Operación. SMAR INDUSTRIES. [Última consulta abril de 2013]
- [11] Kiminek, Darek. **OPC: ¿De qué se trata y cómo funciona?**. MatrikonOPC. 2009. Alberta, Canada. [Última consulta mayo de 2013]
- [12] Kuo, Benjamín C. **Sistemas de Control Automático**. 7ma edición. Prentice Hall, 1996, México. [Última consulta abril 2013]
- [13] Mendiburu, Henry. **Sistema SCADA**. [En línea]. Disponible en: <<http://hamd.galeon.com>>. [Última consulta abril de 2013]

- [14] NAHMAT Pan Control. [En línea]. Disponible en: <http://www.siemens.com/sugar>>. Control Automático para tachos. SIEMENS AG, Alemania. [Última consulta abril de 2013]
- [15] Poel, van der P.W, Schiweck, H. & Schwartz, T. **Sugar Technology: Beet and Cane sugar manufacture**. Verlag Dr. Albert Bartens KG, 1998. Berlín, Alemania. [Última consulta mayo de 2013]
- [16] Rein, Peter. **Cane sugar engineering**. Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007. Berlín, Alemania. [Última consulta mayo de 2013]
- [17] Sitio web Ing. Eduardo Interiano. **Control automático**. [En línea]. Disponible en: <http://ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/>>. [Última consulta 30 de mayo 2013]
- [18] Sociedad Agrícola e Industrial San Carlos, S.A. **Ingenio San Carlos**. [En línea] Disponible en: <http://www.sancarlos.com.ec>>. [Última consulta enero de 2013]
- [19] Spencer, Guilford. Meade, George & Chou, Chung. **Cane Sugar Handbook: A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists**. Doceava Edicion. John Wiley & Sons Inc, 1993, Nueva York, Estados Unidos de América. [Última consulta marzo 2013]
- [20] Sugar Boling Automatic Control. [En línea]. Disponible en: <http://www.smar.com/en/technicalarticles/article.asp?id=20> >. Smar Solutions for the Sugar Production. [Última consulta mayo 2013]
- [21] Transmisor de Microondas Hydrotrac HT02. [En línea]. Disponible en: <http://www.fivesgroup.com/Fivescail/en/Expertise/Equipment/crystallisation/Pages/Probe.aspx>>. Manual de Operación. FIVESCAIL FLETCHER. [Última consulta abril de 2013]
- [22] Transmisor de Presión Rosemount 2051L. [En línea]. Disponible en: <http://www2.emersonprocess.com/en-us/brands/rosemount/pressure/pressure-transmitters/2051-pressure-transmitters/pages/index.aspx>>. Manual de Operación. EMERSON. [Última consulta abril de 2013]
- [23] Viada Aguilera, F. **Metodología para obtener y certificar modelos estadísticos del proceso de cristalización del azúcar**. 2010, Universidad de Holguín, Cuba. [Última consulta mayo de 2013]

Apéndices

A.1 Abreviaturas y glosario

AZÚCAR: Es sacarosa en su forma cristalina obtenida luego del proceso de fabricación. Se presenta en forma de grano muy dulce cuyo color varía desde el café claro hasta el blanco de acuerdo al tipo de azúcar.

BRIX: Es el porcentaje en peso de sólidos disueltos en una solución pura de sacarosa. El brix representa los sólidos aparentes que contiene una solución de sacarosa.

CACHAZA: Lodo producido por la precipitación de impurezas en el proceso de clarificación.

CAÑA: Es la materia prima que ingresa al ingenio, normalmente en la definición del término se incluye la caña limpia más las materias extrañas y el agua que la acompañan.

FALSO GRANO: Cristal de azúcar que no posee el tamaño requerido para ser retenido por las mallas de las centrífugas. Se produce espontáneamente por la operación del tacho en la zona lábil de sobresaturación.

JUGO ALCALIZADO: Jugo mezclado que se combina generalmente con el jugo filtrado y al cual se le añade cal o sacarato de calcio para promover la defecación y precipitación de los sólidos suspendidos.

JUGO CLARIFICADO: Jugo limpio caliente procedente del proceso de clarificación y que será procesado en los evaporadores.

JUGO DILUIDO: Es el jugo diluido que al unirse al jugo primario forma el jugo mezclado.

JUGO FILTRADO: Jugo extraído de la cachaza por los filtros rotativos al vacío, constituido por el agua de lavado y el jugo extraído a la torta de cachaza. Este jugo es generalmente retornado al proceso de clarificación.

JUGO MEZCLADO O MIXTO: Es la mezcla del jugo primario y diluido que se envía a la fábrica para producir el azúcar.

JUGO PRIMARIO: Es el jugo de caña extraído de la masa cañera del primer molino. En general, es todo el jugo extraído sin diluir. En algunos ingenios donde existe desmenuzadora es el jugo combinado de la desmenuzadora y del primer molino.

MAGMA: Mezcla de azúcar de tercera o de segunda con agua o jugo claro. El magma de acuerdo al tipo de templa de la que se obtiene se denomina “B” o “C” y son usadas como núcleo de cristalización para elaborar masas de primera o de segunda, respectivamente.

MASA COCIDA: Mezcla de cristales de azúcar y licor madre, que se produce por cristalización de la sacarosa en los tachos al vacío. Las masas cocidas se clasifican de acuerdo su orden descendiente de pureza en primeras, segundas y terceras o A, B y C.

MELADURA: Es el producto resultante de la concentración del jugo clarificado por evaporación del exceso de agua en los evaporadores.

MIEL: Es el licor madre obtenido por centrifugación de la masa cocida. Puede ser miel I, II, III o A, B, C; dependiendo de la masa cocida de procedencia.

MIEL FINAL: Es el residuo líquido obtenido después de centrifugar la masa tercera o masa cocida “C” y de la cual no resulta económico extraer más azúcar. Este producto también recibe el nombre de miel tercera o melaza.

POL: Es la lectura de la concentración de sacarosa aparente determinada por polarización o rotación óptica de la luz que atraviesa una solución azucarada. En una solución normal de sacarosa, la pol es igual al porcentaje en peso de sacarosa en la solución.

PUREZA: La pureza aparente es la relación porcentual de pol y brix de una solución de sacarosa.

SACAROSA: Disacárido compuesto por una unidad de D-glucosa y otra unidad de D-fructosa. La sacarosa usualmente se encuentra contenida en la caña de azúcar o en la remolacha azucarera.

TACHO: Es un evaporador de un solo efecto, en el cual se lleva a cabo la cristalización del azúcar.

ZAFRA: Período de tiempo que dura la molienda de caña de azúcar y por ende la fabricación de azúcar de caña.

Anexos

Anexo B.1 Conexiones eléctricas del transmisor Hydrotrac HT02

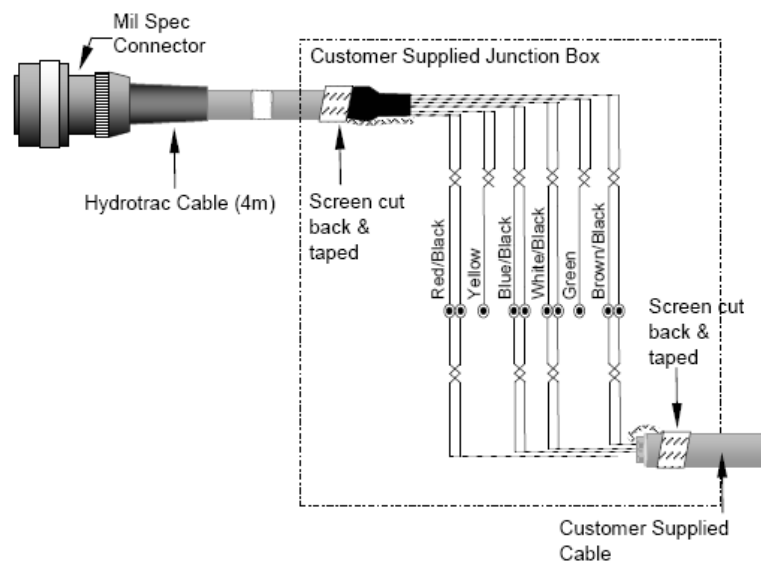
4 ELECTRICAL CONNECTIONS

The Hydrotrac Cable supplied is used for terminating Hydrotrac and is connected internally as shown below.

NOTE: Cables supplied before July 2004 do not contain the brown wire, as this was added to accommodate the second analogue output.

All unused wires should be terminated on the junction box to allow easy access and to prevent the wires touching other wires / earth.

Twisted Pair Number	Connector Pins	Hydrotrac Connection Description	Wire Colour
1	A	+15-30V DC	Red
1	B	0V	Black
2	C	1st Digital Input	Yellow
2	--	-	Black (cut back)
3	D	1st Analogue Positive (+)	Blue
3	E	1st Analogue Return (-)	Black
4	F	RS485 (A)	White
4	G	RS485 (B)	Black
5	J	2nd Digital Input	Green
5	--	-	Black (cut back)
6	D	2nd Analogue Positive (+)	Brown
6	K	2nd Analogue Return (-)	Black
	H	Screen	Screen



Anexo B.2 Especificaciones del Transmisor Rosemount 2051L

Hoja de datos del producto

00813-0109-4101, Rev FA
Diciembre 2011

Rosemount 2051

Especificaciones

ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO

Esta hoja de datos del producto se aplica para los protocolos HART, fieldbus FOUNDATION y PROFIBUS PA a menos que se indique lo contrario.

Conformidad con las especificaciones ($\pm 3\sigma$ (Sigma))

Nuestro liderazgo tecnológico, las avanzadas técnicas de fabricación y un control estadístico del proceso garantizan la conformidad con las especificaciones a un mínimo de $\pm 3\sigma$.

Precisión de referencia

En las ecuaciones establecidas para la precisión de referencia se incluye linealidad basada en los terminales, la histéresis y la repetibilidad.
Para los dispositivos con fieldbus FOUNDATION y PROFIBUS PA, utilizar el rango calibrado en lugar de la amplitud.

Modelos	Estándar	Opción de alto rendimiento, P8	
2051C			
Rangos 2-5	$\pm 0,075\%$ de la amplitud Para amplitudes menores de 10:1, precisión = $\pm \left[0,025 + 0,005 \left(\frac{URL}{Span} \right) \right] \%$ de la amplitud	Rangos 2-5	Opción de alta precisión, P8 $\pm 0,065\%$ de la amplitud Para amplitudes menores de 10:1, precisión = $\pm \left[0,015 + 0,005 \left(\frac{URL}{Span} \right) \right] \%$ de la amplitud
Rango 1	$\pm 0,10\%$ de la amplitud Para amplitudes menores de 15:1, precisión = $\pm \left[0,025 + 0,005 \left(\frac{URL}{Span} \right) \right] \%$ de la amplitud		
2051T			
Rangos 1-4	$\pm 0,075\%$ de la amplitud Para amplitudes menores de 10:1, precisión = $\pm \left[0,0075 \left(\frac{URL}{Span} \right) \right] \%$ de la amplitud	Rangos 1-4	Opción de alta precisión, P8 $\pm 0,065\%$ de la amplitud Para amplitudes menores de 10:1, precisión = $\pm \left[0,0075 \left(\frac{URL}{Span} \right) \right] \%$ de la amplitud
Rango 5	$\pm 0,075\%$ de la amplitud Para amplitudes menores de 10:1, precisión = $\pm \left[0,0075 \left(\frac{URL}{Span} \right) \right] \%$ de la amplitud		
2051L			
Rangos 2-4	$\pm 0,075\%$ de la amplitud Para amplitudes menores de 10:1, precisión = $\pm \left[0,025 + 0,005 \left(\frac{URL}{Span} \right) \right] \%$ de la amplitud		

Estabilidad a largo plazo

Cambios de temperatura de $\pm 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($50\text{ }^{\circ}\text{F}$) y hasta 6,9 MPa (1000 psi) de presión en la línea.

Modelos	Estándar	Opción de alto rendimiento, P8
2051C Rango 1 (CD) Rangos 2-5	$\pm 0,2\%$ del límite superior del rango durante 1 año $\pm 0,1\%$ del límite superior del rango durante 2 años	$\pm 0,125\%$ del límite superior del rango durante 5 años
2051T Rangos 1-5	$\pm 0,1\%$ del límite superior del rango durante 2 años	$\pm 0,125\%$ del límite superior del rango durante 5 años

Rendimiento dinámico

	4-20 mA HART ⁽¹⁾ HART de 1-5 Vcc de baja potencia	Protocolos del fieldbus FOUNDATION y PROFIBUS PA ⁽³⁾	Tiempo de respuesta típico del transmisor HART
Tiempo total de respuesta ($T_d + T_c$) ⁽²⁾ :			
2051C, Rango 3-5:	115 ms	152 ms	Salida del transmisor / Tiempo Presión liberada T_d = Tiempo muerto T_c = Constante de tiempo Tiempo de respuesta = $T_d + T_c$ 63,2% de cambio en escalón total
Rango 1:	270 ms	307 ms	
Rango 2:	130 ms	152 ms	
2051T:	100 ms	152 ms	
2051L:	Consultar <i>Instrument Toolkit</i> [®]	Consultar <i>Instrument Toolkit</i>	
Tiempo muerto (T_d)	60 ms (nominal)	97 ms	
Velocidad de actualización	22 veces por segundo	22 veces por segundo	
(1) El tiempo muerto y la frecuencia de actualización se aplican a todos los modelos y rangos; solo salida analógica. (2) Tiempo de respuesta total nominal en condiciones de referencia de $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($75\text{ }^{\circ}\text{F}$). (3) Tiempo de respuesta del bloque del transductor. No se incluye el tiempo de ejecución de la entrada analógica.			

ESPECIFICACIONES FUNCIONALES

Rango y límites del sensor

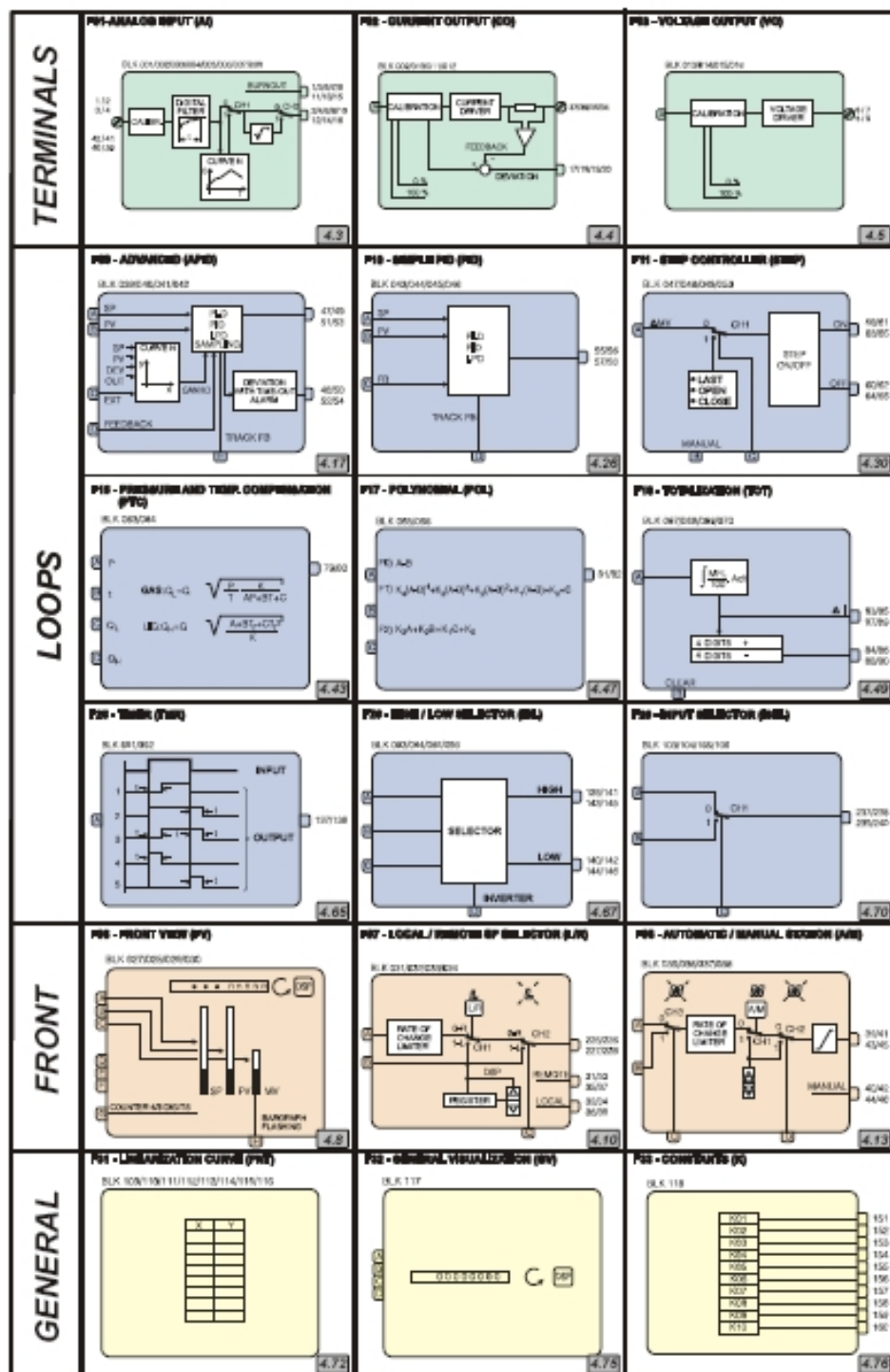
Tabla 7. Rango y límites del sensor

2051CD, 2051CF, 2051CG, 2051L						
Rango	Rango y límites del sensor					
	Amplitud mínima	Superior (URL)	Inferior (LRL)			
			2051C Diferencial Caudalímetros 2051CF	2051C Manométrica ⁽¹⁾	2051L Diferencial	2051L Manométrica ⁽¹⁾
1	1,2 mbar (0,5 pulg. H ₂ O)	62,3 mbar (25 pulg. H ₂ O)	-62,1 mbar (-25 pulg. H ₂ O)	-62,1 mbar (-25 pulg. H ₂ O)	N/A	N/A
2	6,2 mbar (2,5 pulg. H ₂ O)	0,62 bar (250 pulg. H ₂ O)	-0,62 bar (-250 pulg. H ₂ O)	-0,62 bar (-250 pulg. H ₂ O)	-0,62 bar (-250 pulg. H ₂ O)	-0,62 bar (-250 pulg. H ₂ O)
3	24,9 mbar (10 pulg. H ₂ O)	2,49 bar (1000 pulg. H ₂ O)	-2,49 bar (-1000 pulg. H ₂ O)	-979 mbar (-393 pulg. H ₂ O)	-2,49 bar (-1000 pulg. H ₂ O)	-979 mbar (-393 pulg. H ₂ O)
4	0,207 bar (3 psi)	20,6 bar (300 psi)	-20,6 bar (-300 psi)	-979 mbar (-14,2 psig)	-20,7 bar (-300 psi)	-979 mbar (-14,2 psig)
5	1,38 bar (20 psi)	137,9 bar (2000 psi)	-137,9 bar (-2000 psi)	-979 mbar (-14,2 psig)	N/A	N/A

(1) Se supone una presión atmosférica de 14,7 psig.

Anexo B.3 Bloques del controlador Smar CD600 Plus

Control Function Blocks



PI0 - DIGITAL INPUT (DI) 4.6	PI1 - DIGITAL OUTPUT (DO) 4.7	PI2 - PULSE TOTALIZATION INPUT (PII) 4.51	PI7 - DIGITAL INPUT WITH TRIP CONTROL (DI) 4.83
PI3 - MULTIPLIER-DIVIDER-ADDER-SUBTRACTOR (ADMS) 4.33	PI5 - SQUARE ROOT (SR) 4.37	PI4 - LINEARIZATION (LR) 4.38	PI6 - DERIVATIVE / LEAD-LAG (DJ) 4.40
PI8 - BASIC COMPARATOR (BC) 4.55	PI9 - LIMITER WITH ALARM (LMT) 4.60	PI2 - DOUBLE ALARM (ALM) 4.58	PI4 - LOGIC (LOG) 4.63
PI0 - OUTPUT SELECTOR (OSL) 4.71			
PI1 - SETPOINT GENERATOR (SPG) 4.56	PI7 - INTERNAL / EXTERNAL SELECTOR (ISEL) 4.68	PI6 - COMPENSATION ADJUSTER (ADJ) 4.69	
COMMUNICATION 4.77 4.79 4.80			

Anexo B.4 Fotografías del proyecto



Figura B.4.1. Piso de tachos.



Figura B.4.2. Tacho #9 Automatizado.



Figura B.4.2. Válvulas Automáticas del Tacho #9.



Figura B.4.2. Implementación física de la solución.