



TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero en Automática

Autor

Carlos Ernesto

Rivero Fernández

Tutor

MSc. Mónica Mulet Hing

Colaborador

Téc. Héctor López Ramírez

Noviembre, 2023

TRABAJO DE DIPLOMA

Título

**Propuesta de automatización del tacho cristalizador de azúcar
crudo del central Francisco Antonio Rosales Benítez**

Autor

Carlos Ernesto Rivero Fernández

Tutor

MSc. Mónica Mulet Hing

Colaborador

Téc. Héctor López Ramírez

Noviembre, 2023

Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad de Oriente como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución para los fines que estime convenientes, tanto de forma parcial como total, y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Nombre y firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Nombre y firma del autor

Nombre y firma del Tutor

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Carrera

Fecha

Nombre y firma del Jefe de Departamento

Fecha

Dedicatoria

A mis padres queridos por educarme y forjar lindos sentimientos en mí y el carácter de cumplir con todas las metas propuestas.

A mi querida hermana por estar siempre ahí

A todos los profesores que a lo largo de mi formación académica me brindaron sus conocimientos

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo y comprensión.

A mi hermana Yanet Rivero Fernández.

A mi tutora MSc. Mónica Mulet Hing, por sus consejos.

A todos los profesores que pusieron su granito de arena en mi formación profesional.

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas

⁰Brix: Unidad en la que se expresa la pureza del azúcar.

⁰C: (Celsius)Unidad en la que se expresa la temperatura.

Hz: (Hertz)Unidad en la que se expresa la frecuencia.

EPE: Elevación del punto de ebullición.

inHg: (Pulgadas de Mercurio). Unidad en la que se expresa la presión negativa.

OP: Terminal grafica para el operador.

PLC: Controlador Lógico Programable, por sus siglas en ingles.

psi: Unidad en la que se expresa la presión.

Listado de Imágenes

Figura 1. Flujo de producción	7
Figura 2. Esquema funcional del tacho cristalizador	15
Figura 3. Esquema de nivel de automatización.....	17
Figura 4. Sensor de microondas	35
Figura 5. Comportamiento de las microondas en un producto	37
Figura 6. Creación de nuevo proyecto	39
Figura 7. Entorno de programación.....	40
Figura 8. Botones dedicados.....	40
Figura 9. Terminal gráfica táctil GOT 100	42
Figura 10. Configuración de la terminal grafica con GT Designer3	44
Figura 11. Visualización del EROS	45
Figura 12. Funcionamiento del mímico	46
Figura 13. Gráficos de comportamiento	46
Figura 14. Mediciones	47
Figura 15. Alarma.....	48
Figura 16 Ajuste del lazo de control	48

Listado de Tablas

Tabla 1. Cantidad de señales en el panel.....	26
Tabla 2. Señales digitales de entrada	27
Tabla 3. Señales digitales de salida	27
Tabla 4. Señales analógicas de entrada	27
Tabla 5. Señales analógicas de salida	28
Tabla 6. Trasmisores.....	32
Tabla 7. Configuración del autómata.....	38
Tabla 8. Simbología del lenguaje LADDER.....	40
Tabla 9. Característica de la terminal gráfica	42

Resumen

El sector azucarero ha sido, sin lugar a dudas, el más importante en la producción agroindustrial cubana en las últimas décadas. Uno de sus principales propósitos es la obtención de cristales de azúcar de alta calidad logrando destreza y eficiencia en el proceso de cristalización. En la realización de este trabajo se propone un sistema de control automático, mediante la utilización de Autómatas Programables (PLC's), en el tacho cristalizador de la EAA: "Francisco Rosales Benítez." Dada la situación que presenta el central de realizar el proceso de cristalización del azúcar de forma manual, esto trae consigo que varíe la calidad del producto. Por lo que se hace necesario implementar un proceso automático en el tacho cristalizador que controle los parámetros que rigen la calidad del producto y de esta forma se obtendrá un producto final con mejor calidad y eficiencia.

Palabras claves: PLC, Tacho cristalizador, SCADA, lazo de control.

Abstract

The sugar sector has been, without a doubt, the most important in Cuban agroindustrial production in recent decades. One of its main purposes is to obtain high quality sugar crystals achieving skill and efficiency in the crystallization process. In carrying out this work, an automatic control system is proposed through the use of Programmable Automata (PLC), in the crystallizing container of the EAA Francisco Rosales Benitez. Given the situation that the plant is currently carrying out the sugar crystallization process manually. This means that the quality of the product varies. Therefore, it is necessary to implement an automatic process in the Crystallizer container that controls the parameters that affect the quality and efficiency.

Key-words: PLC, Crystallizer pan, SCADA, control loop.

Índice

Listado de símbolos, términos especiales y abreviaturas no normalizadas	I
Listado de Imágenes	II
Listado de Tablas	III
INTRODUCCION	1
Capítulo 1. Cristalizadores de azúcar por evaporación al vacío	6
1.1 Flujo de producción	6
1.1.1 Área de Basculador y Molinos	7
1.1.2 Área de Generación de Vapor y Planta Eléctrica.....	8
1.1.3 Área de Purificación.....	8
1.1.4 Área de Evaporación	9
1.1.5 Área de Cristalización.....	9
1.1.6 Área de Centrifugación	9
1.2 Caracterización del proceso y objeto tecnológico	10
1.2.1 Proceso Tecnológico de los Tachos	12
1.2.2 Descripción del flujo tecnológico del tacho cristalizador	13
1.2.3 Caracterización actual del sistema de automatización del tacho cristalizador del central Francisco Antonio Rosales Benítez.....	15
1.3 Papel de los autómatas programables en el empleo de la cristalización de azúcar	16
1.3.1 Implementación de los autómatas programables en la industria azucarera cubana	16
1.4 Los Controladores Lógicos Programables (PLC's)	18
1.4.1 Funciones de los PLC's	18
1.4.2 Campo de aplicación de los PLC's	19
1.4.3 Ventajas de los PLC's.....	19
1.5 Controladores Lógicos Programables Mitsubishi (PLC's)	21

1.5.1	Estructura del PLC.....	21
1.5.2	Características de la serie (FX3U) Mitsubishi a utilizar en la automatización del tacho cristalizador del central Julio Antonio Mella.....	22
1.5.3	Ventajas e inconvenientes de los Mitsubishi serie (FX3U)[8]	23
Capítulo 2: Propuesta de automatización del tacho cristalizador		25
2.1	Descripción y funcionamiento del sistema de cristalización	25
2.1.1	Proyecto de instalación y supervisión del sistema de control	25
2.2	Relación de señales en el panel de mando (PM5).....	26
2.3	Descripción de los Lazos a Automatizar	28
2.4	Estrategias de Automatización.....	32
2.5	Instrumentación propuesta en el campo	33
2.6	Sensor de microondas (transmisor de densidad).....	36
2.6.1	Ventajas de la medición por transmisión de microondas.....	38
2.6.2	Principio de funcionamiento del sensor de microondas.....	38
2.7	Configuración del autómeta Mitsubishi Fx3u.....	39
2.7.1	Software GX-Devolper-Fx utilizado en la programación del autómeta.....	40
2.8	Referencia a la Terminal gráfica táctil GOT 100	43
2.8.1	Software GT Designer3 utilizado en la configuración de la pantalla táctil	45
2.9	El Sistema de Supervisión	46
2.10	Análisis económico	51
CONCLUSIONES.....		52
RECOMENDACIONES		53
BIBLIOGRAFIA		54
ANEXOS		55

INTRODUCCION

En la actualidad, la industria azucarera cubana desempeña un papel importante en el desarrollo económico del país. Se basa en la producción de caña de azúcar utilizando los recursos naturales de las zonas productoras. Los ingenios azucareros han implementado un programa de trabajo que beneficia no solo a Cuba, sino también a la comunidad latinoamericana. Han enfocado sus esfuerzos en programas educativos y ambientales, lo que ha brindado estabilidad en todos los niveles y ha demostrado su capacidad competitiva en los mercados internacionales. El uso de nuevas tecnologías en la industria azucarera ha tenido una gran influencia en la mayoría de los países desarrollados que se dedican a la producción de azúcar. En muchos casos, esto determina la posición en el mercado de sus economías. En un entorno competitivo a nivel mundial, es imperativo para aquellos que desean aprovechar las condiciones favorables del mercado de productos azucareros aplicar una política de desarrollo y modernización constante. Esto permitirá conservar el sector como un complejo productivo eficiente, flexible y diversificado.

Esta industria posee características particulares: consume una significativa cantidad de recursos energéticos en estrecha relación con el desarrollo del proceso productivo en general y proporciona una mayor fuente de empleo, si la misma no contase con un alto nivel de automatización. Es importante contar con una industria eficiente, que fortalezca la actividad productiva del ser humano para alcanzar elevados niveles de producción, además, que contribuya al ahorro de combustibles, con el fin de evadir altos precios y evitar la contaminación ambiental [1].

Los sistemas digitales con fines industriales han evolucionado en las últimas décadas debido a los avances alcanzados en las tecnologías de integración de los circuitos, la aparición de nuevas arquitecturas de computadoras e interconexión entre ellas y al desarrollo de nuevos lenguajes y sistemas de comunicación.

La industria azucarera a nivel global ha estado comprometida en la implementación de técnicas innovadoras para automatizar el proceso productivo,

aunque todavía hay etapas que requieren supervisión manual. La optimización del proceso de cristalización de azúcar ha sido objeto de numerosos estudios, pero en muchos lugares sigue siendo un desafío sin resolver, dependiendo de la habilidad humana para obtener resultados satisfactorios.

La operación conocida en la industria azucarera como cocción del azúcar, es esencialmente el proceso de cristalización que tiene lugar en los tachos al vacío, sean estos continuos o discontinuos; este proceso es la clave del éxito en la fabricación de azúcar.

La automatización de este proceso requiere de dispositivos adecuados y calibrados correctamente ya que a lo largo del mismo se miden parámetros físicos involucrados en la calidad del producto final.

En las industrias azucareras se han utilizados diferentes elementos de medición y control de la concentración (⁰Brix) en masas cocidas sometidas a la cristalización, tales como: el basado en el principio de la elevación del punto de ebullición (E.P.E), el refractómetro de tacho, el conductímetro (conductividad de la masa) y el cuitómetro han provocado que se busquen otras alternativas para lograr mayor exactitud en la medición de una de las variables más importante de este proceso. Numerosos estudios han arrojado que grandes productores como Estados Unidos, Australia y Brasil utilizan otras técnicas de medición de concentración tales como: método de radiofrecuencia y el de microondas[2].

Los sistemas de regulación para el control de la cristalización, transitaron desde los reguladores autónomos para el control de cada variable con instrumentación neumática, hasta el desarrollo alcanzado en la actualidad donde se introducen nuevas tecnologías mediante las cuales un grupo de tareas esenciales para el proceso quedan, ahora, coordinadas y registradas.

En Cuba, se implementaron variantes con algunos de los métodos de medición de la concentración mencionados anteriormente, que proporcionaron discretos y aislados resultados[3].

Actualmente se está incursionando en la incorporación de tecnologías novedosas que aporten fiabilidad y exactitud en las mediciones realizadas en el proceso,

teniendo en cuenta que las mismas deben contar con un análisis previo en cuanto al índice económico.

De esta forma se identificó con claridad las deficiencias fundamentales presentadas en el proceso de cristalización en el Central Azucarero Francisco Antonio Rosales Benítez:

1. La ausencia de la instrumentación adecuada en el Tacho Cristalizador, provoca que no se logra mantener un estable tamaño del grano.
2. No se cuenta con un sistema automatizado que responda cíclicamente y en tiempo real con las características eficientes con las que debe funcionar el proceso más importante dentro de la industria azucarera.
3. Falta un sistema de almacenamiento y registro de las variables de entrada/salida en el proceso.

A partir de lo tratado anteriormente, se define como **problema de investigación:** la necesidad de un sistema automatizado que permita mejorar la eficiencia en el proceso de cristalización que tiene lugar en el Tacho Cristalizador de la EAA “Francisco Antonio Rosales Benítez.”

Objeto de estudio: Tacho cristalizador de la EAA: “Francisco Antonio Rosales Benítez.”

Objetivo general: elaborar una propuesta de automatización para el proceso de cristalización y cocción de la masa, en el tacho cristalizador.

Campo de acción: utilización de autómatas programables en procesos de la industria azucarera, en este caso en particular, en el tacho cristalizador.

Hipótesis: si se elabora una propuesta de automatización en el tacho cristalizador se garantiza una mayor eficiencia en el proceso de cristalización y cocción de la masa, obteniéndose el tamaño deseado de los cristales de sacarosa en el menor tiempo posible, sin riesgo de aparición del falso grano o reproducción.

Objetivos específicos:

- Analizar la bibliografía existente referente a la automatización de los tachos cristalizadores

- Caracterizar el funcionamiento del proceso de cristalización de la azúcar en Central Azucarero “Francisco Antonio Rosales Benítez.”
- Definir las variables de entrada/salida del proceso que definen la calidad del producto.
- Simular la programación de los ciclos de control.

Método Teórico

Análisis y Síntesis: Estudio del proceso para definir posibles soluciones en el proceso de cristalización y cocción de la masa.

Método Empírico: Búsqueda con personal experto y especialistas de experiencia en el proceso que se investiga.

Observación y Revisión documental: Para detectar la situación operacional, es necesario dicho método porque se profundizará en las vías y soluciones que se planteará en la investigación relacionada con el tacho cristalizador.

Significación práctica de la investigación: Este trabajo garantiza repetitividad y uniformidad en la calidad de las templeas, eliminando conglomerados y falsos granos; además, disminuye los tiempos de cocción, el consumo de agua y vapor y aumenta la productividad del proceso en el tacho.

Aporte práctico: Propuesta de un esquema de control basado en un PLC, que solucione la ineficiencia del proceso productivo del área de tachos del Central Azucarero. “Francisco Antonio Rosales Benítez.”, con una mayor operatividad, seguridad, confiabilidad y velocidad de respuesta, según los regímenes de trabajo.

Este trabajo se ha estructurado en introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones y anexos. En cada capítulo se dará solución a las tareas propuestas de la investigación.

En el Capítulo 1: Se muestra un estudio sobre el estado del arte del proceso de obtención de azúcar desde su surgimiento hasta la actualidad y se expondrán los esquemas de control propuestos en la literatura nacional o extranjera para determinar con cual se pudiera diseñar un programa que logre un funcionamiento

que no afecta la obtención del producto final. Se realiza una descripción sobre el autómata MITSUBISHI FX3U propuesto para el diseño de la automatización.

En el Capítulo 2: Se caracteriza el proceso en cuanto a los sensores-actuadores y equipos auxiliares que se implementarán. Se dará una breve panorámica sobre el software que se va a utilizar para realizar la programación del PLC, y se validará la propuesta mediante su simulación. También se realiza la valoración técnica-económica para evaluar el presupuesto estimado de la inversión para este trabajo.

Finalmente planteamos las conclusiones y recomendaciones, además de anexarse todas las figuras, esquemas de control, algoritmos y la programación del PLC que facilitan la comprensión del trabajo.

Capítulo 1. Cristalizadores de azúcar por evaporación al vacío

Desde el comienzo de la industrialización, el hombre ha buscado las formas y procedimientos para que los trabajos se realizaran de forma más ágil y productiva. El siglo XX marcó el inicio de una etapa en el desarrollo científico-técnico sin precedentes hasta el momento. En él se han logrado cambios significativos en lo referente a:

- Tecnología de los procesos productivos
- Teoría de los sistemas de control
- Técnicas de computación

El conocimiento más profundo de la estructura de las sustancias naturales de los procesos químicos y biológicos, la mayor productividad, así como la explotación de nuevas fuentes de energía, han permitido la creación de tecnologías las cuales requieren de sistemas de control más avanzados.

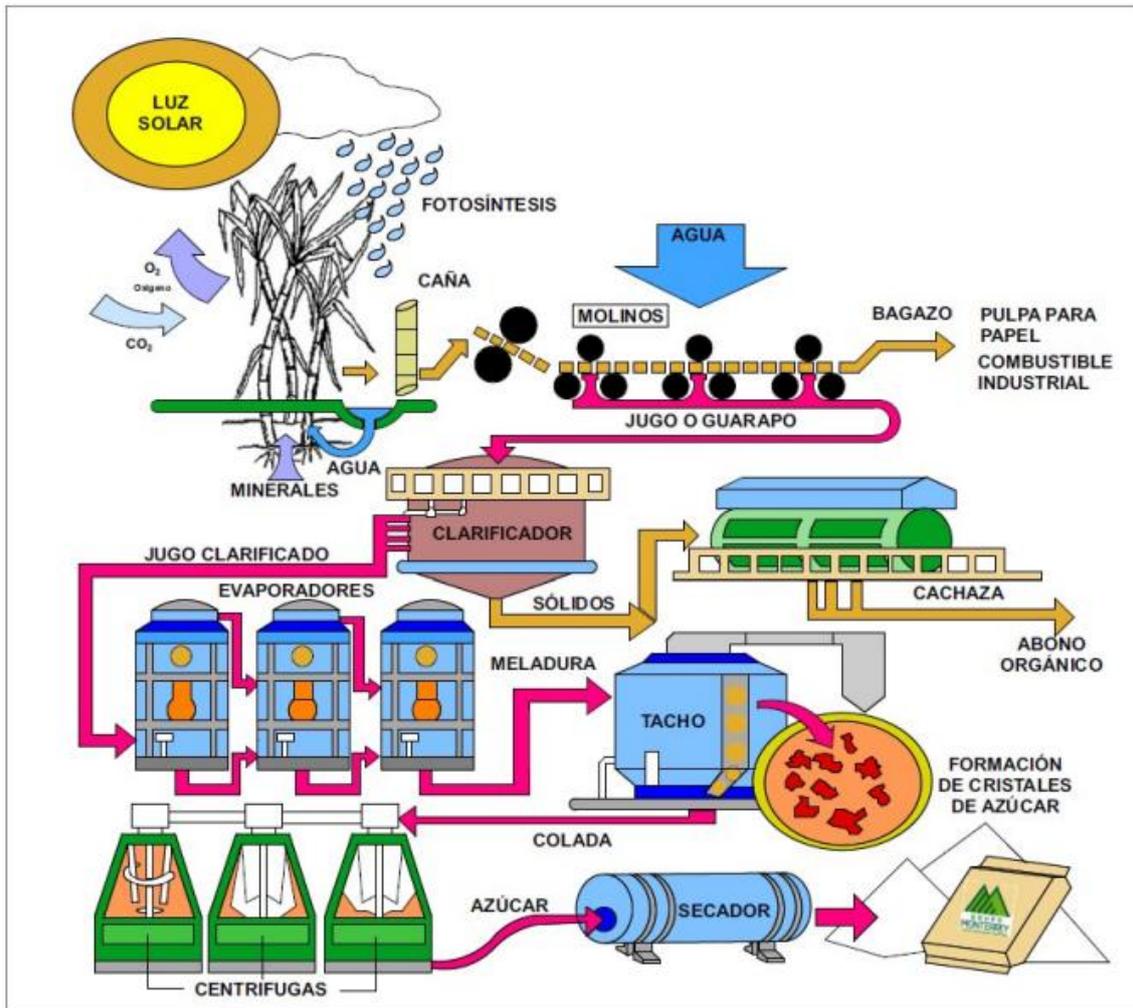
Las modernas tecnologías, capaces de hacer frente a las tareas de automatización en la industria azucarera, resultan aplicables a escala global, las mismas aportan excelentes alternativas para incrementar los niveles de eficiencia en procesos tan importantes para industria como la cristalización, que tiene lugar en los tachos al vacío. Se aborda de forma general el proceso de obtención de azúcar de caña. Se exponen aspectos teóricos relacionados con el proceso de cristalización y los esquemas de control aplicables a los mismos según sus condiciones de operación.

1.1 Flujo de producción

El proceso de fabricación de azúcar comienza desde el campo donde se selecciona la materia prima (caña de azúcar), la que pasa directo al basculador en camiones y la que se pasa por los centros de acopio o limpieza para quitarle un determinado por ciento de materias extrañas (Paja, tierra, etc.) hasta que llega al basculador del central, de aquí pasa por varias etapas hasta la obtención del azúcar como producto final fundamental.

Estas etapas o subproceso están compuesto por: Área de Basculador y Molinos, Área de Generación de Vapor, Área Planta Eléctrica, Área de Purificación, Área

de Evaporación, Área de concentración y Cristalización y Área de Centrifugación, peso y envase. (Fig. 1).



(Fig. 1). Flujo de Producción

1.1.1 Área de Basculador y Molinos

La caña es preparada con cuchillas picadoras, al salir de los equipos de preparación, el colchón de caña preparado, pasa a las tolvas Donnelly, que alimenta a la planta moledora o tándem compuesta por molinos (5) en los cuales utilizando la presión necesaria para extraer el máximo de jugo, para mejorar la eficiencia de este proceso se adiciona agua en contracorriente al bagazo que va hacia el último molino, este proceso se conoce como imbibición. El remanente queda en el bagazo residual que es utilizado como combustible en las calderas, así como materia prima para la fabricación de tableros de bagazo. Esta constituye la primera etapa del procesamiento de fabricación de azúcar crudo.

Adicionalmente el jugo extraído en cada molino, se recircula al molino anterior, lo que recibe el nombre de maceración.

1.1.2 Área de Generación de Vapor y Planta Eléctrica

El bagazo de caña, biomasa residual del proceso de extracción del jugo, posee un excelente valor calórico, y constituye un combustible renovable que incinerado en los generadores de vapor produce el vapor que mueve las turbinas de contrapresión para el accionamiento de los generadores eléctricos.

El vapor de escape de las turbinas de contrapresión se destina al proceso de fabricación de azúcar, el condensado caliente no contaminado salido del área de fabricación, se recupera y emplea como agua de alimentación en los generadores de vapor, cerrando un ciclo de muy alta eficiencia.

La energía eléctrica que se genera a partir de biomasa cañera o forestal como combustible, deja de generarse con combustible fósil disminuyendo el consumo de este importante portador energético y reduce la contaminación ambiental.

1.1.3 Área de Purificación

La función principal de los procesos de purificación es la de eliminar impurezas y otros no azúcares presentes en el guarapo, al menor costo posible y con el mínimo de pérdidas en azúcar. En esta área se recibe el jugo crudo o mezclado, es sometido al proceso de alcalización, calentamiento, flasheo y sedimentación para desechar de él aquellas sustancias indeseables, tales como el bagacillo, la tierra y un conjunto de no azúcares en forma de cachaza para poder entregar un jugo clarificado óptimo (claro, transparente y brillante).

En la alcalización se neutraliza la acidez del jugo, llevando el PH del jugo a valores entre 7.6 a 7.9, utilizando para ello lechada del cal preparada previamente en tanques, donde se mezcla cal con agua de retorno, posteriormente el jugo alcalizado pasa a los calentadores de jugo, donde es elevada su temperatura desde los 102 a los 105 °C. Mediante dos bancos de calentadores de tubo y coraza y utilizando vapor de escape suministradas al calentamiento del segundo vaso de duples o primer vaso de cuádruples. Posteriormente pasa al tanque flash donde ocurre el flasheo con el objetivo de eliminar los gases y estabilizar su

temperatura, la temperatura de salida del jugo que debe estar en la línea de salida de jugo hacia el clarificador debe ser de 98 a 100 °C.

1.1.4 Área de Evaporación

La estación evaporadora es la responsable de eliminar gran parte del agua contenida en el jugo (alrededor del 80%), concentrando y convirtiendo en meladura por la acción del vapor bajo el principio del múltiple efecto. Ello ocurre en dos etapas: primero el calentamiento del jugo clarificado entre 112 a 115 °C, para ello se usa vapor de escape de los pre-evaporadores de 10–12 psi y luego la evaporación mediante transferencia de calor latente o de cambio de fase a través de superficie calórica, evaporación a simple efecto a presión en pre-evaporadores, evaporación a doble efecto y por último la evaporación a múltiple efecto a vacío en los cuádruples efectos siguiendo en orden el flujo del jugo en esta área que al evaporar entre el 70 y el 75 % de toda su agua lleva el °Brix a 60-65 %. Esta se define como el centro de balance energético de los ingenios, pues el área recibe vapores de escape de alta presión y entrega vapores vegetales a calentadores y tachos; por ello su operación, limpieza y mantenimiento están estrechamente vinculados a la eficiencia energética del ingenio.

1.1.5 Área de Cristalización

La meladura pasa a los tachos donde continúa la evaporación de agua, lo que ocasiona la cristalización del azúcar. Es decir que, al seguir eliminando agua, llega un momento en el cual la azúcar disuelta en la meladura se deposita en forma de cristales de sacarosa. Los tachos trabajan con vacío para efectuar la evaporación a baja temperatura y evitar así la caramelización del azúcar.

En este momento se añaden semillas a fin de que sirvan de medio para los cristales de azúcar, y se va añadiendo miel o meladura según la templa que se está elaborando. El crecimiento de los cristales continúa hasta que se llena el tacho.

1.1.6 Área de Centrifugación

Es la última operación básica de ingeniería del proceso de producción de azúcar crudo en los casos en que se comercializa sin secarse. El área recibe la masa

cocida de los tachos, la acondiciona en los mezcladores y posteriormente la somete a un proceso de centrifugación para separar los granos de azúcar producidos, de su licor madre. Además, retorna al proceso aquellos productos intermedios que pueden ser agotados aún (mieles “A”, “B” y azúcar “C” y B” en forma de magma), de forma que si su operación no es la adecuada entonces se rompe el equilibrio del proceso tecnológico y se puede afectar todo el trabajo de purificación, evaporación y tachos.

1.2 Caracterización del proceso y objeto tecnológico

El proceso de cristalización es una de las etapas más importantes en la fabricación del azúcar. Esta etapa requiere de una excelente preparación, experiencia y habilidad por parte de los operadores.

Aún con operadores experimentados, la uniformidad, repetitividad y los tiempos de cocción son variables incidiendo en la calidad del azúcar y productividad del área. El objetivo básico de esta operación es producir todos los granos que se emplearán en la fabricación del azúcar crudo comercial; es la operación más delicada en todo el proceso por su repercusión en el agotamiento y la calidad final del azúcar, por eso la preparación previa del equipo y de los materiales que intervienen en ella resultan indispensables si se quiere que el resultado final de la misma sea el óptimo. [4]

Se emplea para este propósito el método de cristalización por semillamiento completo que parte, de la introducción de un núcleo previamente preparado en una solución de alcohol y polvo de azúcar a una meladura virgen dentro del tacho, de una pureza dentro del rango de 78 % a 82 %.

Sobre la cristalización se apoya la estrategia de trabajo de los tachos, las condiciones de pureza del medio en la que se inocula el semillamiento (núcleo), y la agitación vigorosa del mismo garantiza que se alcance la más alta velocidad de cristalización de todo el proceso de fabricación, y con esto es posible un crecimiento inicial del grano de azúcar desde 0.010 mm hasta un intervalo de 0.10 mm a 0.15 mm en la fase de la cristalización. De no lograrse este crecimiento no se podrá disponer de una semilla apta para la producción de las masas comerciales.

Para alcanzar este crecimiento el método empleado parte del principio de sembrar el grano en un medio lo más puro posible, con un nivel de sobresaturación en la meladura que permita maximizar la velocidad de cristalización sin riesgo de que se produzcan nuevas cristalizaciones; estas condiciones se obtienen en los límites de las zonas meta estable y la intermedia donde la sobresaturación debe permanecer constante, y las velocidades de cristalización que se obtienen en meladuras de un intervalo de $\pm 80\%$ de pureza están en el orden de los 840 a 1105 mg de sacarosa/m²min. Durante el proceso de cristalización se trabaja en un intervalo de sobresaturación de (1.15 a 1.20), según la tabla del manual de operación esto corresponde a un valor de concentración de 77 °Brix a 78 °Brix, debido a que es el momento fértil para obtener el surgimiento de los cristales en muy poco tiempo, sin riesgo de aparición del falso grano, pues con este proceder se garantiza un crecimiento volumétrico del grano igual a 12 veces suficiente para garantizar una semilla de dimensiones adecuadas [4].

Es por lo anterior que la sobresaturación del medio es la variable que es necesario controlar, para la realización de la siembra de los granos a través de la inoculación del medio de semillamiento. El método de Microondas ha demostrado elevada precisión y fiabilidad para medir el contenido de agua en las soluciones de sacarosa lo que es inversamente proporcional al contenido de sólidos (°Brix).

Los equipos comprendidos dentro del área de tacho se definen como

Tacho: Recipiente grande de metal, en los que se efectúa la cocción de la meladura para concentrarla y facilitar la cristalización del azúcar, es un equipo activo que para la realización de sus funciones requiere del suministro de vapor, mieles, agua y debe estar conectado al vacío.

Semillero: equipo abierto y dotado de movimiento para mantener de forma homogénea todo el magma de semilla que se produce en las centrifugas, para ser alimentado a los tachos comerciales o ser disuelta y convertida en meladura.

Granero: equipo abierto y dotado de movimiento para mantener de forma homogénea los productos en su interior. Existen de acuerdo con sus funciones graneros comerciales para tratamiento de la semilla mejorada, de agotamiento para grano fino y pies de masa comerciales.

Cristalizadores: equipo abierto y dotado de movimiento para mantener de forma homogénea toda la masa. Se consideran equipos activos porque forman parte del ciclo de agotamiento de las masas en los tachos.

Recibidores o porta templas: equipo abierto, preferiblemente con movimiento lo más rápido posible; que recibe la masa directamente del tacho y la distribuye en los cristalizadores comerciales o de agotamiento [4].

Otros aspectos a considerar:

Grado Brix: Es la concentración de sólido soluble en una solución.

Sobresaturación: Rebasa la concentración de materia disuelta que corresponde a la saturación por la misma disolución, contiene un exceso de soluto a una temperatura determinada.

Cristalización: Acción o efecto de formación de cristales, fase de la fabricación del azúcar, consiste en extraer en forma de cristales el jarabe previamente espesado.

Masa cocida: Es el producto que se obtiene en el tacho después de haberse efectuado la cristalización y está compuesto por cristales de azúcar y miel.

Meladura: Jugo de caña concentrado de 60° a 65° Brix, este material es el que se utiliza en el tacho cristalizador para efectuar la cristalización.

Calandria: Es un dispositivo circular conformado de varios tubos metálicos conductores de calor los cuales están dispuestos verticalmente, mandrilados en ambos extremos a dos placas metálicas con un tubo central de mayor diámetro que los anteriores, por donde baja la solución que ha incrementado su concentración.

Puntista: Es el hombre que opera el tacho, en otros países se le llama tachero.

1.2.1 Proceso tecnológico de los tachos

En los tachos se prepara el grano que se emplea como medio de semillamiento para la cristalización, y se establece un sistema de alimentación de materiales de diferentes purzas para hacerlo crecer hasta el tamaño apropiado para su comercialización [4].

Estas operaciones en los tachos tienen como fin:

- Concentrar los materiales que se les alimentan hasta un nivel de sobresaturación tal que permita un rápido crecimiento de los granos.
- Agotar progresivamente los materiales mediante una operación por etapas.
- Lograr como producto final un azúcar granulado de tamaño tal que cumpla los requisitos normados.

Este conjunto de operaciones tiene un tiempo de duración que oscila entre las 24 y las 32 horas y está vinculado a las condiciones de operación y a la destreza del personal del área. Por estas razones el área tecnológicamente es compleja, pues a pesar de que las operaciones básicas de ingeniería que la componen son cíclicas, estas deben ejecutarse en una forma tal, que el resultado final de ello sea la continuidad del flujo de producción, por tanto, para obtener resultados óptimos es necesario tener medios confiables para medir y controlar las operaciones durante las diversas etapas del proceso de cocimiento.

Los controles fundamentales durante la operación del cocimiento son:

- El control de la concentración de la templa.
- El control de la presión de vapor en la calandria del tacho.
- El control del vacío mediante la inyección de agua al condensador.
- Medición e indicación continua del nivel de la masa en el tacho.

El éxito en la explotación de este proceso depende del conocimiento que se tenga sobre el modo de operación, y la forma de aprovechar las capacidades instaladas en la correcta asignación de los parámetros.

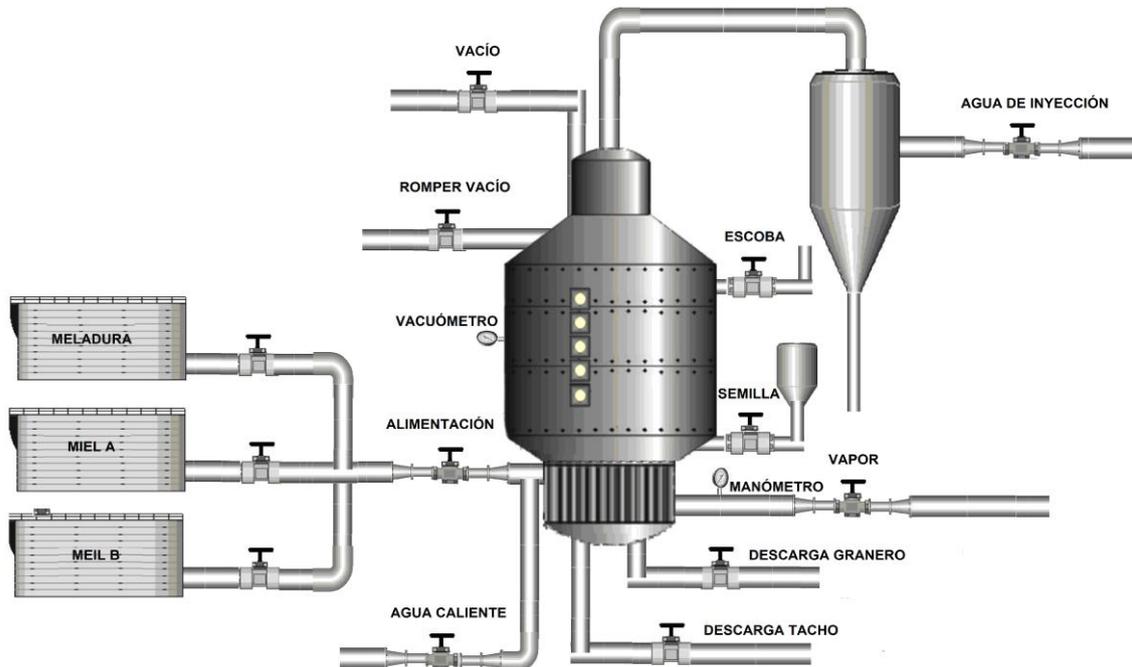
1.2.2 Descripción del flujo tecnológico del tacho cristalizador

La meladura se obtiene por los evaporadores después de concentrar el jugo clarificado hasta valores de 60 °Brix a 65 °Brix, es bombeada al área de tachos y recepcionada en el tanque destinado al proceso de cristalización. Esta meladura se introduce en el tacho cristalizador hasta un nivel de (30 cm a 50 cm) por encima de la calandria como se muestra en el esquema (Fig. 2), y comienza a

concentrarse con una presión de vapor en la calandria de 8 psi (55,2 KPa) y de vacío a 26 inHg (6,5 KPa), hasta alcanzar valores de 77 °Brix a 78 °Brix de sobresaturación. Las muestras para determinar el grado de concentración son tomadas por el puntista de forma manual por la sonda del tacho, hasta que la meladura concentrada obtiene la densidad adecuada [4].

Al llegar a la concentración adecuada el puntista reduce la presión del vapor de calentamiento a 2 psi (13.8 KPa) y de vacío a 20 inHg (4.9 KPa). Luego introduce el núcleo o cristal 600, que no es más que una cantidad determinada de alcohol al 94 % y de azúcar blanca tamizada, solución que es sometida a una vigorosa agitación para garantizar el crecimiento uniforme del grano. Cuando se introduce este núcleo el crecimiento inicial de los cristales es un proceso estacionario que tarda alrededor de los (30 min a 40 min), hasta que aparecen los primeros núcleos cristalinos perceptibles en el tacho y se forma el llamado grano virgen o grano fino, esparciéndose el crecimiento por todo el material. A partir de esto el puntista sigue tomando muestras a través de una lámina de vidrio para observar el proceso de formación de los granos, en caso de que aparezcan nuevos cristales más pequeños que no corresponden con los del tamaño inicial, formados de la meladura concentrada, abre una válvula de entrada de agua caliente que disuelve los falsos granos. Una vez que se obtiene la cristalización en todo el material se mantienen las condiciones estacionarias hasta que el desarrollo de los granos muestre una definición y dureza que garanticen un crecimiento uniforme y estable. Luego se restablecen las condiciones normales de operación en cuanto a presión de vapor en la calandria de 8 psi, y de vacío en el cuerpo del tacho a 26 inHg. Entonces el puntista abre una de sus válvulas de selección de material para dar entrada de meladura o miel, con el objetivo de alimentar el tacho de una de las dos en dependencia del grado de pureza que necesiten esos granos, hasta un volumen de 42 m³. Para que los granos se sigan alimentando y creciendo volumétricamente hasta obtener una templa suficiente de masa cocida, que debe estar en los 89 °Brix y 91 °Brix de concentración final, compuesta por cristales de azúcar y miel [4].

Con este proceder se concluye el proceso de cristalización y se pasa a la fase de producción de grano fino, donde serán separados en las centrifugas con el objetivo de obtener el azúcar como producto final.



(Fig. 2). Esquema funcional del tacho cristalizador

1.2.3 Caracterización actual del sistema de automatización del tacho cristalizador del central Francisco Antonio Rosales Benítez

El tacho cristalizador en el que se introducirán las técnicas de automatización está compuesto por un manómetro que trabaja a una presión de vapor en la calandria de 8 a 10 psi, y un vacuómetro a un vacío en el cuerpo de 23 a 27 inHg. Se puede apreciar la carencia de medios técnicos de automatización que posee el equipo, los cuáles no garantizan la eficiencia y la calidad requerida del producto final en este subproceso tan importante en la industria azucarera. La automatización del tacho cristalizador se hace esencial en el área de fabricación de este ingenio, dando la posibilidad de desarrollar un sistema de control y de operación centralizado con la fiabilidad y operatividad optimizada al máximo.

1.3 Papel de los autómatas programables en el empleo de la cristalización de azúcar

La incorporación de los autómatas programables en la industria azucarera ha tenido un auge en las últimas décadas en los países productores de azúcar de remolacha y de caña, el control de varios procesos de esta industria es implementado sobre estos dispositivos[4].

La implementación de una automatización eficiente es una herramienta clave para optimizar el rendimiento de sistemas que involucran múltiples fases, como el tacho de cristalización. En el ámbito industrial, esto implica manejar grandes cantidades de información relacionada con equipos, dispositivos y características del proceso para lograr un control preciso y efectivo.

1.3.1 Implementación de los autómatas programables en la industria azucarera cubana

Desde finales de la década del 90, en el país se trabaja con novedosos elementos para el control en los procesos industriales azucareros. En la zafra del 97-98 se instalaron autómatas cubanos NODOREM producidos por el ICID, con el objetivo de ser utilizados como parte de los sistemas de control y supervisión de varias fábricas azucareras del país.

El mismo fue utilizado en la empresa azucarera Jesús Rabí del municipio de Jovellanos, en la provincia de Matanzas, con dificultades como: tratamiento limitado a 8 bit e interfaz de comunicación por tarjeta red BMS en slot ISA de la PC referenciar. De las experiencias obtenidas por la explotación de este modelo de autómatas, se decidió la fabricación en nuestro país de un nuevo autómata más acorde con las necesidades del proceso azucarero. Como resultado de estas experiencias surgen en esa época los PLC NOVA, compuestos por un módulo inteligente que posee 16 entradas digitales y 24 analógicas así como 8 salidas digitales y 8 analógicas, además, permite ampliarse con módulos de extensión que aumentan la configuración de las entradas/salidas, según la aplicación deseada. Su electrónica es altamente inmune al ruido y puede explotarse en condiciones adversas de temperatura y vibración. El mismo fue diseñado en su principio para asumir todas las prestaciones requeridas por la mencionada

industria. Con el transcurso del tiempo se fueron realizando revisiones para mejorar el funcionamiento del mismo. En la empresa azucarera Ramón Ponciano también se empleó este PLC, logrando por vez primera ejecutar diferentes fases del proceso que suceden bajo ciertas condiciones de estados de variables, siguiendo los algoritmos del controlador lógico programable[5].

Posteriormente, debido a los adelantos científicos y al nivel de integración de los componentes electrónicos, surge el PLC Glofa de LG, que está instalado todavía en más del 30% de las industrias azucareras del país. Más adelante, en el central azucarero George Washington se incorporó en la estación de cristalización de azúcar refino el control basado en autómatas programables, con el PLC Mitsubishi, para mejorar las condiciones de trabajo de los operadores del área al liberarlos, mediante el control automático, de la manipulación constante de las válvulas del tacho. Esta tecnología de PLC está siendo actualizada en todo el país por sus prestaciones fiables y robustas en el entorno industrial[5].

Los PLC's actuales pueden comunicarse con otros controladores y computadoras en redes de área local, y son una parte fundamental de los modernos sistemas de control distribuido. Dado el desarrollo obtenido internacionalmente en la Automatización en los tiempos actuales y en específico en los Autómatas Programables (PLC's) así como la Periferia Descentralizada y utilización de Buses Estándares, paralelo al desarrollo de la electrónica, ha traído como consecuencia una estrategia generalizada para la Automática como muestra la siguiente figura (Fig.3).



(Fig. 3). Esquema de nivel de automatización

1.4 Los Controladores Lógicos Programables (PLC's)

Se entiende por Controlador Lógico Programable (PLC) o Autómata Programable a toda máquina electrónica, diseñada para controlar procesos secuenciales en tiempo real y en medio industrial. Su manejo y programación puede ser realizada por personal eléctrico o electrónico sin conocimientos informáticos. Realiza funciones lógicas: series, paralelas, temporizaciones, conteos y otras más potentes, como cálculos, regulaciones, etc.[6].

1.4.1 Funciones de los PLC's

Redes de comunicación: Permiten establecer comunicación con otras partes del sistema de control. Las redes industriales permiten la comunicación y el intercambio de datos entre autómatas en tiempo real. En unos cuantos milisegundos pueden enviarse mensajes e intercambiar tablas de memoria compartida.

Sistemas de supervisión: También los Autómatas permiten comunicarse con ordenadores provistos de programas de supervisión industrial. Esta comunicación se realiza por una red industrial o por medio de una simple conexión por el puerto serie del ordenador.

Control de procesos continuos: Además de dedicarse al control de sistemas de eventos discretos los autómatas llevan incorporadas funciones que permiten el control de procesos continuos. Disponen de módulos de entradas y salidas analógicas y la posibilidad de ejecutar reguladores PID que están programados en el autómata.

Entradas-salidas distribuidas: Los módulos de entrada/salida no tienen por qué estar en el armario del autómata. Pueden estar distribuidos por la instalación, se comunican con la unidad central del autómata mediante un cable de red.

Buses de campo: Mediante un solo cable de comunicación o bus se pueden conectar a los bus captadores y accionadores, reemplazando al cableado tradicional. El autómata consulta cíclicamente el estado de los captadores y actualiza el estado de los accionadores [6][7].

1.4.2 Campo de aplicación de los PLC's

El PLC por sus especiales características de diseño tiene un campo de aplicación muy extenso. La constante evolución del hardware y software amplía constantemente este campo para poder satisfacer las necesidades que se detectan en el espectro de sus posibilidades reales[7]. Su utilización se da fundamentalmente en aquellas instalaciones en donde es necesario un proceso de maniobra, control o señalización, por tanto, su aplicación abarca desde procesos de fabricación industriales de cualquier tipo a transformaciones industriales hasta control de instalaciones. Sus reducidas dimensiones, la facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenar los programas para su posterior y rápida utilización, la modificación o alteración de los mismos, hace que su eficacia se aprecie fundamentalmente en procesos en que se producen necesidades tales como:

- Espacio reducido.
- Procesos de producción periódicamente cambiantes.
- Procesos secuenciales.

Ejemplos de aplicaciones generales:

- Agricultura (Sistemas de regadíos, máquinas recolectoras).
- Gestión técnica de edificio (Control de ascensores, Centrales telefónicas).
- Construcción (Construcción de puentes, sistemas de perforación de túneles).
- Industria alimenticia (Fabricación de pan, Procesamiento de alimentos).
- Servicio público (Tratamiento para aguas residuales, Bomba de agua Potable).
- Transporte (Control de sistemas sanitarios en barcos de pasajeros, ferrocarril).
- Medicina (Esterilización, Comprobación de aparatos de respiración artificial).

1.4.3 Ventajas de los PLC's

La técnica estándar de los autómatas programables, su estructura modular y la

gran potencia de los programadores se combinan para dar lugar a las siguientes ventajas[7]:

- Menor tiempo empleado en la elaboración de proyectos debido a que:
- No es necesario dibujar el esquema de contactos.
- No es necesario simplificar las ecuaciones lógicas, la capacidad de almacenamiento del módulo de memoria es lo suficientemente grande.
- La lista de materiales queda sensiblemente reducida, y al elaborar el presupuesto correspondiente se eliminará parte del problema que supone el contar con diferentes proveedores, distintos plazos de entrega, entre otros.
- Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado ni añadir aparatos.
- Manejo fácil, gracias a un montaje simple y diferentes técnicas de conexión.
- Mínimo espacio de ocupación.
- Menor costo de mano de obra de la instalación.
- Economía de mantenimiento, además de aumentar la fiabilidad del sistema, al eliminar los contactos móviles, los mismos autómatas pueden detectar e indicar averías.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo Autómata.
- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado.
- Si por alguna razón la máquina queda fuera de servicio, el Autómata sigue siendo útil para otra máquina o sistema de producción.
- Comunicación sencilla con otros autómatas y ordenadores a través de procesadores de comunicación y redes locales propias.
- Funcionamiento sin ventiladores para todas las aplicaciones estándares.
- Programación sencilla, gracias a la estructuración del programa y al empleo de partes de programas normalizadas.

- Adaptabilidad máxima, gracias a las diferentes opciones de entrada/salida.
- Montaje sencillo de los bloques, resistentes a vibraciones, mediante sujeción por resortes y tornillos a elementos de bus o a bastidores estables.
- Puesta en marcha fácil, gracias a los aparatos de programación y mantenimiento con numerosas ayudas en programas y pruebas.

1.5 Controladores Lógicos Programables Mitsubishi (PLC's)

Los PLC's compactos de las series FX ofrecen soluciones económicas para tareas pequeñas a medias de control y posicionamiento de 100 a 256 entradas/salidas integradas en la industria, artesanía y técnica doméstica. Este autómata cuenta con las siguientes series FX1S, FX1N, FX2N, FX2NC, FX3U, con la excepción de la serie FX1S, en caso de modificaciones de las instalaciones se pueden ampliar todas las series FX, por lo cual ofrecen la posibilidad de seguir creciendo en función de la necesidad real, además existe la posibilidad de integración en redes. De esta forma los controles de la familia FX pueden comunicarse con otros PLC y Sistemas de Regulación MMI (Tarjetas de reguladores PID de la familia Mitsubishi) [8].

Así estos pueden integrarlos por un lado como estaciones locales en las redes de Mitsubishi y por todos los lados de equipos esclavos en redes abiertas se pueden ampliar todas las series FX, además el autómata cuenta con diferentes componentes. (Ver anexo #1) [8].

1.5.1 Estructura del PLC

El autómata Mitsubishi tiene 5 partes fundamentales, éstas son módulo de comunicación, módulos digitales de entrada salida, módulos analógicos de entrada salida, la CPU, y los módulos de posicionamiento.

El módulo de comunicación permite la interface con RS232/RS422/RS485 para la conexión de dispositivos periféricos y enlaces autómata-autómata. Tiene módulos de red para Profibus/DP, CC-LINK, interface AS, CANopen, Ethernet y para la configuración de las redes propias de Mitsubishi.

Módulos digitales de entrada y salida es para gran variedad de niveles de señales con salidas de relé o de transistor.

Módulos analógicos de entrada y salida se utiliza para el procesamiento de señales de corriente/tensión y para el registro de temperatura con una opción de conexión directa para termómetros de resistencia Pt100 y para termopar (Ver anexo 2).

CPU es la Unidad Central de Procesos, el auténtico cerebro del sistema. Es el encargado de recibir órdenes del operario a través de la consola de programación y el módulo de entradas. Después las procesa para enviar respuestas al módulo de salidas.

Módulos de posicionamiento no es más que módulos contadores de alta velocidad con soporte para la conexión de encoders rotatorios incrementables y de módulos de posicionamiento para servomotores y motores de paso a paso[8].

1.5.2 Características de la serie (FX3U) Mitsubishi a utilizar en la automatización del tacho cristalizador del central Julio Antonio Mella.

Rango de entradas/salidas: 16, 32,48, 64, 80 ó 128 puntos.

(Máx. 256 en unidad base/de extensión), (ampliable hasta 384 E/S).

Memoria de programa: 64 k pasos (estándar).

Procesamiento de instrucciones básicas: 0,065 μ s/instrucción lógica.

Procesamiento de señales analógicas: Hasta 80 entrada analógicas, 48 salidas analógicas.

Resolución analógica: 8, 12 y 16 bits.

Extensiones analógicas: Disponibles 14 módulos diferentes con entradas y salidas analógicas y para el registro de la temperatura [8].

Posicionamiento integrado:

6 contadores de alta velocidad (100 kHz)

2 contadores de alta velocidad (10 kHz)

3 salidas de tren de pulsos (100 kHz),

Sólo módulos de salida de transistor

Opcionalmente:

ADP (Módulo de comunicación definido por el fabricante) con contadores de alta velocidad (200 kHz)

ADP con salidas de tren de pulsos (200 kHz)

ADP con salidas de tren de pulsos (1 MHz).

Características de equipamiento.

- Se puede elegir entre modelos con salidas de relé o de transistor.
- Interfaz serie integrado para la comunicación con PC y HMI: Interfaz Hombre Máquina.
- Control de posicionamiento integrado.
- Módulos de interface intercambiables para el montaje directo en la unidad base.
- LEDs para la indicación de los estados de entrada y salida.
- Slot para cassettes de memoria.
- Reloj de tiempo real integrado.
- Ampliable mediante módulos de entradas/salidas digitales, módulos especiales y módulos ADP.
- Sistemas de programación de fácil funcionamiento, como software de programación según IEC1131-3 (EN 61131), equipos HMI y equipos de programación manuales.

1.5.3 Ventajas e inconvenientes de los Mitsubishi serie (FX3U)[8]

La fuerza de la serie FX3U radica en las siguientes características:

- Menor tiempo empleado en la elaboración de proyectos debido a que el tiempo que tarda en ejecutar una instrucción es 0.065 μ s.
- Su pequeño tamaño compacto con un estilo de diseño común.
- De buen funcionamiento y costo.
- De control y alta precisión de alta velocidad.

- Muy avanzados en funciones integradas y fáciles de usar funciones analógicas.
- Mayor número de puntos de control.
- Capacidad de memoria expandida, hardware y software, compatibilidad de software para FX2N.
- Mejora de la comunicación y la demanda de trabajo en redes.
- Los modelos estándar en conformidad con las normas internacionales.
- Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado ni añadir aparatos.
- Manejo fácil, gracias a un montaje simple y diferentes técnicas de conexión.
- Economía de mantenimiento. Además de aumentar la fiabilidad del sistema, al eliminar los contactos móviles, los mismos autómatas pueden detectar e indicar averías.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo Autómata.
- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado.
- Comunicación sencilla con otros autómatas y ordenadores a través de procesadores de comunicación y redes locales propias.
- Programación sencilla, gracias a la estructuración del programa y al empleo de partes de programas normalizadas.
- Adaptabilidad máxima, gracias a las diferentes opciones de entrada/salida y a la expansibilidad modular.
- Puesta en marcha fácil, gracias a los aparatos de programación y mantenimiento con numerosas ayudas en programas y pruebas.

Capítulo 2: Propuesta de automatización del tacho cristalizador

En este capítulo se realizará una propuesta de automatización en la cual se utilizarán diferentes medios de automatización, en función de garantizar una óptima calidad en el proceso de cristalización.

2.1 Descripción y funcionamiento del sistema de cristalización

Para una mejor descripción se divide en tres niveles.

El campo: formado por los elementos primarios, transmisores y elementos de acción final.

El sistema de control: formado por el panel con el PLC.

El sistema de supervisión: formado por la PC y controlador operacional gráfico (OP).

En el primer nivel el cableado de las señales de campo, enlazará los elementos transmisores con el PLC situado en el cuarto de control. Todas las señales tanto analógicas como digitales que son procesadas por el autómata pueden ser visualizadas en el sistema de supervisión EROS instalado en la PC y en el OP. Están previstas señalizaciones de alarmas en el sistema de supervisión y en el OP, para las situaciones de mayor peligrosidad como:

- Disminución del vacío en el tacho.
- Disminución de la presión del vapor de escape.
- Alta concentración de la masa cocida.
- Nivel por debajo de la altura de la calandria.
- Presión baja del aire de instrumentación.

Todas estas alarmas son representadas en la pantalla táctil y configurada en el sistema de supervisión EROS. En los mismos se tendrá acceso a todos los equipos tecnológicos, así como a los reguladores del proceso.

2.1.1 Proyecto de instalación y supervisión del sistema de control

El panel de mando (PM5) tiene al autómata y sus módulos E/S analógicas y digitales, que gobiernan al tacho cristalizador. Desde el panel de mando (PM6) donde se encuentra ubicada la Terminal gráfica GOC-100 (Controlador operacional gráfico), se gobiernan las válvulas montadas en el campo y se

visualizan las variables del proceso. El operador tiene la opción de manipular las válvulas de forma manual o activar el modo automático. Las señales de entrada son procesadas por el autómata, para realizar las funciones de los lazos de regulación de las variables concebidas, y actuar directamente sobre el proceso, mediante las señales de salidas analógicas, garantizando así que se puedan tomar decisiones y controlar el proceso. El Sistema de Supervisión y Control empleado se basa fundamentalmente en la utilización de un autómata (PLC), una computadora (PC) los cuales se comunican a través del protocolo MODBUS RTU y (OP), que se comunicará con el autómata utilizando el protocolo propio de la firma Mitsubishi MELSEC. El sistema tiene una estructura distribuida, la computadora y el panel de operación gráfica, constituyen los elementos de comunicación con el operador; y mediante los mismos éste podrá actuar y observar el estado del proceso. El autómata empleado, ubicado en el panel correspondiente del sistema (PM5) es de Mitsubishi Electric Corporation, modelo: **FX3U-32MR/ES**.

El procesador del autómata (CPU) almacena y ejecuta el programa de aplicación. Controla los puntos de E/S locales, a través de un bus de comunicación común. Las interfaces del sistema con el proceso se realizan con instrumentos de campo de gran fiabilidad.

Algunos tienen un pantalla digital para visualizar la variable medida, entre otras prestaciones. La salida de los mismos cumple con el estándar de 4 a 20 mA.

En la CPU del autómata se configura toda la programación básica de la aplicación:

- Ejecución de los lazos de regulación PID de las variables analógicas.
- Realización de todas las secuencias de operación.

Procesamiento de los datos de entrada y actuación sobre las salidas del proceso.

2.2 Relación de señales en el panel de mando (PM5)

Al panel de mando (PM5) se le van a conectar las señales que se muestran en la (tabla 1)

Tabla 1. Cantidad de señales en el panel

Entradas analógicas	Salidas analógicas	Entradas digitales	Salidas digitales
6	4	9	8

Tabla 2. Señales digitales de entrada

No	Nombre	Descripción
1	YSH208	Indicación Válvula de Semilla abierta / cerrada (DCV208).
2	YSH202	Indicación Válvula de Escoba abierta / cerrada (VMD202).
3	YSH204	Indicación Válvula de Vacío abierta / cerrada (VMD204).
4	YSH205	Indicación Válvula de Meladura abierta / cerrada (VMD205).
5	YSH206	Indicación Válvula de Miel A abierta / cerrada (VMD206).
6	YSH207	Indicación Válvula de Miel B abierta / cerrada (VMD207).
7	YSH210	Indicación Válvula de Pase abierta / cerrada (VMD210).
8	YSH209	Indicación Válvula de Romper vacío abierta / cerrada (VMD209).
9	PSL201	Indicación de la presión del aire de Instrumentación.

Tabla 3. Señales digitales de salida

No	Nombre	Descripción
1	ZY208	Mando de la válvula de semilla abierta/cerrada (DCV208)
2	ZY202	Mando de la válvula de escobas abierta/cerrada (VMD202)
3	ZY204	Mando de la válvula de vacío abierta/cerrada (VMD204)
4	ZY205	Mando de la válvula de alimentación de meladura (VMD205)
5	ZY206	Mando de la válvula de alimentación de Miel A (VMD206)
6	ZY207	Mando de la válvula de alimentación de Miel B (VMD207)
7	ZY210	Mando de la válvula de pase de vapor (VMD210)
8	ZY209	Mando de la válvula para romper el vacío en el tacho (VMD209)

Tabla 4. Señales analógicas de entrada

No	Nombre	Descripción
1	PT203	Presión de vapor en la calandria
2	PT201	Presión absoluta en el tacho cristalizador
3	LT216	Nivel de masa cosida en el tacho cristalizador
4	TT217	Temperatura de masa cosida en el tacho cristalizador
5	TT218	Temperatura del vapor que entra al tacho cristalizador
6	DT200	Concentración de la masa cosida

Tabla 5. Señales analógicas de salida

No	Nombre	Descripción
1	PCV203	Válvula de regulación Presión de vapor en la calandria
2	PCV201	Válvula de regulación Vacío en el tacho cristalizador
3	DCV200	Válvula de regulación Concentración de la masa en el tacho cristalizador
4	DCV211	Válvula de regulación Alimentación de agua caliente al tacho cristalizador

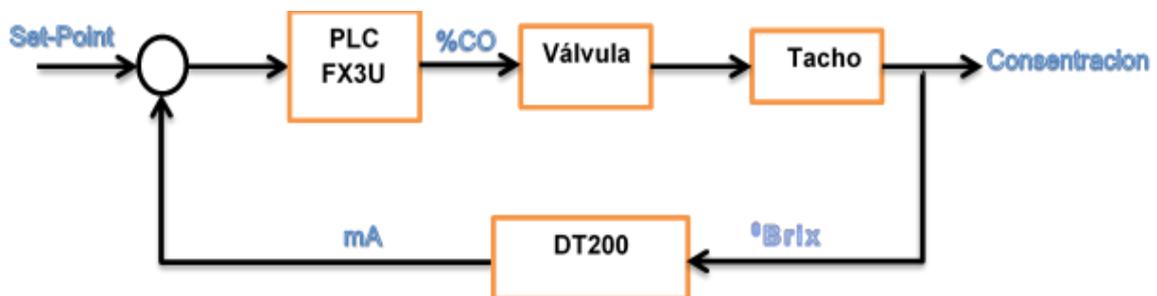
2.3 Descripción de los lazos a automatizar

Dentro del autómatas se programarán las secuencias establecidas para la operación del tacho, así como los lazos de regulación correspondientes. Las estrategias de control propuestas para la implementación de estos lazos son las siguientes:

- Medición, indicación, registro, señalización y regulación de la densidad que incluye al lazo de la sobresaturación y al lazo de alimentación de material al tacho cristalizador.
- Medición, indicación, registro, señalización y regulación de la presión del vapor en la calandria del tacho cristalizador.
- Medición, indicación, registro, señalización y regulación de la presión absoluta en el colector individual de vacío del tacho cristalizador.
- Medición, indicación, registro, señalización del nivel de masa cocida en el tacho cristalizador.

Lazo de control de la sobresaturación

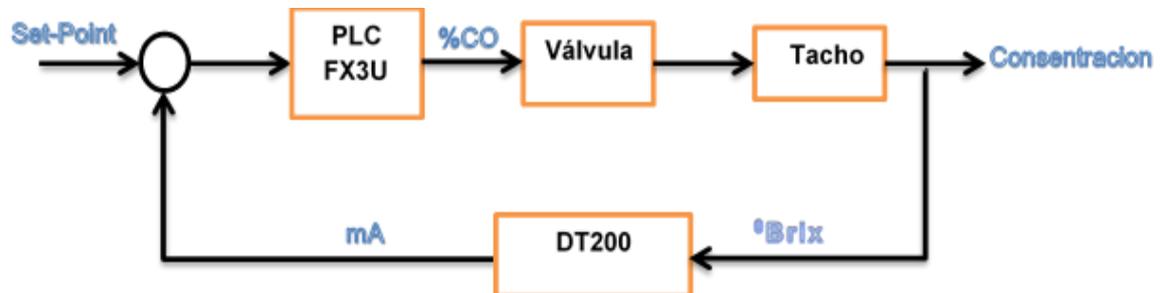
El lazo de control de la sobresaturación es el más importante en el trabajo de los tachos al vacío, debido a que por medio de él se controla el desarrollo del cristal y la templa. Si la sobresaturación llega a hacerse demasiado baja, puede disolverse parte del grano y si alcanza valores demasiados altos, pueden formarse falsos granos.



Para medir la sobresaturación de la masa cocida se empleará la medición de la concentración en °Brix mediante microondas con un transmisor de densidad, el cual ofrece la posibilidad de controlar la templa completa con una precisión de ± 0.2 °Brix. Esta variable es de gran importancia a la hora de introducir la semilla, con el nivel de sobresaturación apropiado se maximiza la velocidad de cristalización sin riesgos de que se produzcan falsos cristales. La variable de medición de densidad (DT200) se conecta al módulo M3 de entradas analógicas del autómeta a través del canal No3, cuando se alcanza el valor prescrito de sobresaturación se devuelve la respuesta correspondiente a través de la salida

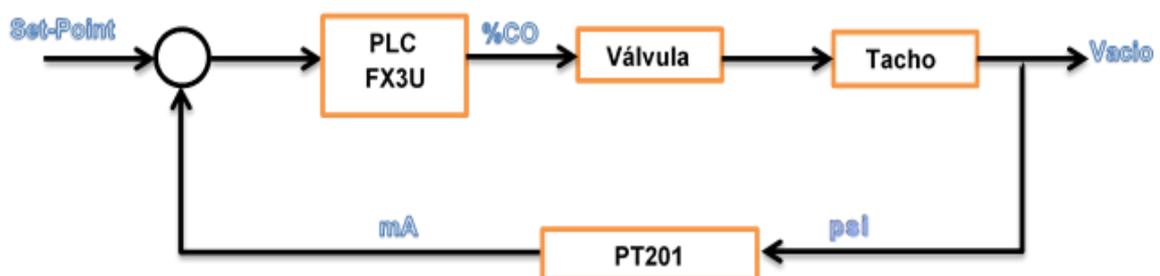
digital Y5 hacia la válvula DCV208 (ON/OFF), a través de la cual se introducirá la semilla al tacho.

Lazo de control de la alimentación de los materiales al tacho cristalizador



Después de formarse y establecerse el grano, el proceso de cocción consiste en el crecimiento de los cristales hasta el tamaño adecuado. Esto comprende establecer la alimentación del material al tacho a una velocidad adecuada. Cuando aumenta la consistencia de la masa cocida, aumenta su concentración, el controlador PID implementado en el autómatas recibe el valor de la concentración, y envía una señal de control al posicionador de la válvula de mariposa instalada en la línea de alimentación del material, y esta acciona de forma proporcional a la concentración de la masa cocida. La variable de medición de densidad (DT200) se conecta al módulo M3 de entradas analógicas del autómatas a través del canal No3, procesándose con un algoritmo PID que devuelve la respuesta correspondiente a través canal del No3 del módulo de salidas analógicas M4, hacia la válvula de mariposa (DCV200), que regulará la alimentación de meladura o mieles, según sea el caso.

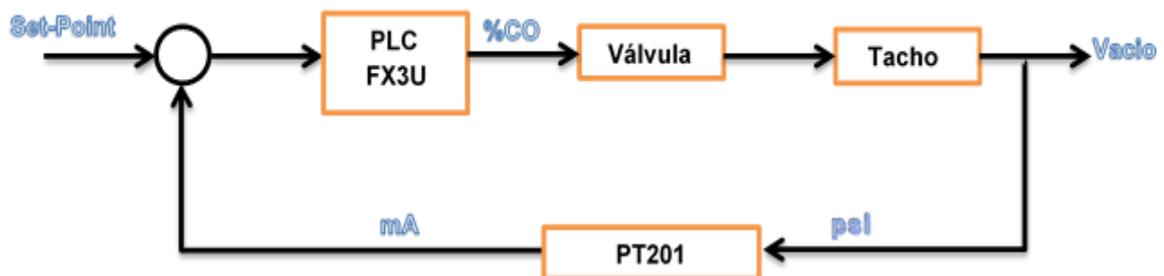
Lazo de control de la presión de vapor en la calandria



La presión del vapor de escape utilizado en los tachos debe ser de 8 psi a 10 psi (55,2 KPa a 68,9 KPa). Presiones muy bajas retardan la evaporación, disminuye la circulación de la masa en el tacho y aumenta el tiempo necesario para

completar las plantas. El objetivo fundamental de este lazo, es mantener el régimen de transferencia de calor lo más estable posible, con vista a disminuir el tiempo de cocción y el consumo de vapor. El elemento de medición de este lazo es un transmisor de presión, el regulador PID implementado en el autómata, envía una señal de control al posicionador de la válvula mariposa que está instalada en la tubería de vapor de escape que alimenta la calandria del tacho y acciona de acuerdo al valor de presión existente en la calandria, el autómata recibe el valor de la presión y de acuerdo a su valor, ajusta de forma proporcional el consumo de vapor. La variable de medición de presión en el tacho (PT203) se conecta al módulo M3 de entradas analógicas del autómata a través del canal No2, procesándose con un algoritmo PID que devuelve la respuesta correspondiente a través canal No1 del módulo de salidas analógicas M4, hacia la válvula de mariposa (PCV203) que regulará el flujo del vapor que entra y mantiene la presión necesaria.

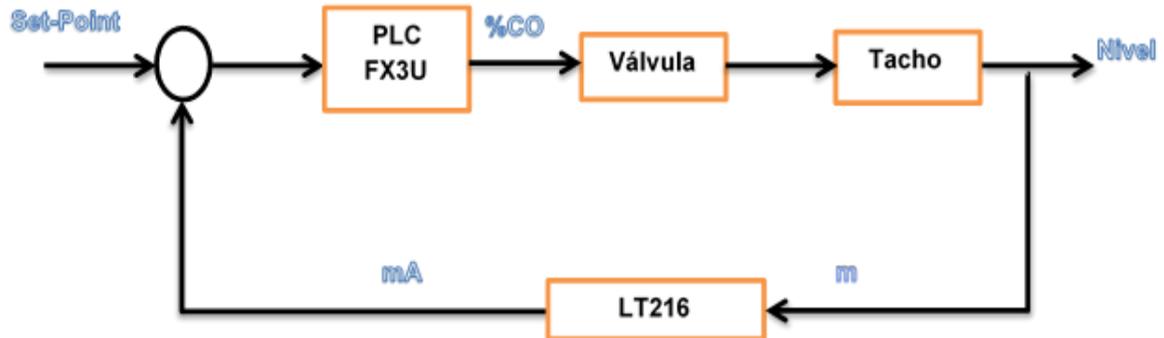
Lazo de control de la presión absoluta



El control de la presión absoluta (vacío) es esencial para un cocimiento apropiado. El control se realiza mediante una válvula mariposa, que regula el flujo de agua al condensador del tacho. La falta de control de la presión absoluta origina variaciones de la temperatura de la masa cocida, y esto implica cambios en la sobresaturación, que es el principal parámetro en la regulación del tacho. El elemento de medición de este lazo es un transmisor de presión absoluta, el regulador PID implementado en el autómata, envía una señal de control al posicionador de la válvula mariposa instalada en la tubería de agua de inyección al condensador. La variable de medición de presión absoluta en el tacho (PT201) se conecta al módulo M3 de entradas analógicas del autómata a través del canal No.1, procesándose con un algoritmo PID que devuelve la respuesta

correspondiente a través canal No.1 del módulo de salidas analógicas M4, hacia la válvula de mariposa (PCV201) la cuál regulará la presión de vacío en el valor deseado.

Supervisión del nivel de la masa cocida



El nivel se mide con un transmisor de presión diferencial, situado en el fondo del tacho. A medida que se avanza en el proceso de cocción, se supervisará el nivel de la masa cocida en el tacho hasta completar el volumen de operación. El operador establece el rango de trabajo desde el Supervisorio para el comienzo y el final de la templa, además puede manipular la válvula el mismo de forma manual, o desde el panel de mando. La variable de medición de nivel en el tacho (LT216) se conecta al módulo M3 de entradas analógicas del autómeta, a través del canal No4.

2.4 Estrategias de automatización

El sistema de control está concebido por un Controlador Lógico Programable PLC que es el encargado de recibir todas las señales del campo; transmisores y elementos de acción final. Estas señales se procesan para actuar sobre los mismos; válvulas automáticas, ON/OFF o de guillotinas. Este procesador tiene incluido funciones de control PID el cuál se utiliza como regulador principal en lazos de control, además tiene incluido sistemas de comunicación para equipos periféricos, en este caso computadora Industrial como supervisorio SCADA y pantalla táctil (HMI). Para establecer la comunicación con estos dispositivos primeramente se tienen en cuenta el cableado de los mismos.

El PLC Fx-3U tiene un puerto de comunicación Fx3U-ADP 485, este puerto es para comunicar a través de la conexión RS 485. Como la PC se comunica por

RS-232 se necesita un conversor de norma RS 485 a RS 232. El protocolo de comunicación entre ambos equipos es MODBUS RTU donde la PC industrial es el máster y el PLC el esclavo. Con el módulo de comunicación Fx3U-ADP485 se puede comunicar hasta una distancia de 500 m entre máster y esclavos, se puede ver con más detalles en el. Para comunicar la pantalla táctil (HMI) con el PLC se ideó con el protocolo MELSEC propio de la firma. Con este protocolo la pantalla táctil visualiza los registros, estados de contactos y bobinas del programa ejecutándose en tiempo real en el PLC de forma transparente. Es decir, las mismas direcciones que se declaran en el programa de registro y marcas internas ya sean para bobinas y contactos, son las mismas que se declaran en la programación de la pantalla táctil. Esto facilita el trabajo de puesta en marcha para la optimización del tiempo en su configuración, es un sistema con menos grados de complejidad comparado con otros protocolos, y es totalmente robusto en el intercambio de información.

Para la comunicación entre ambos equipos se utiliza el cable especial de la firma MITSUBICHI que aparece indicado en el esquema. Este cable es para comunicar por RS-422 con una distancia máxima de 30 m. La PC industrial del tacho va integrar a la RED INDUSTRIAL ETHERNET existente en la industria donde se visualizan las mediciones y señales de control de todas las áreas automatizadas del central azucarero. Para integrar el supervisorio del tacho a la red industrial, se configura la conexión de red TCP/IP de la PC y del EROS y se conecta la computadora al SWITCH de la red a través del cable UTP con conectores RJ-45.

2.5 Instrumentación propuesta en el campo

En la (tabla 6) muestra descripción de la instrumentación, así como las variables y la cantidad de equipamiento necesario para la automatización del tacho cristalizador del central.

Tabla 6. Transmisores

Descripción	Variable	Cantidad
PT203 Trasmisor Smart de presión con indicador digital incorporado incluidos los herrajes de fijación. Alimentación 24 V CD y salida 4 a 20 mA, rango 0 a 2,5 bar	Presión de Vapor en la Calandria. (psi)	1
PT201	Presión de vacío	1

Propuesta de automatización del tacho cristalizador de azúcar crudo del central Francisco Antonio Rosales Benitez

Descripción	Variable	Cantidad
Trasmisor Smart de presión absoluta con indicador digital incorporado incluidos los herrajes de fijación. Alimentación 24 V CD y salida 4 a 20 mA, rango 0 a 1,0 bar absoluto	en el tacho. (inHg)	
LT216 Trasmisor Smart de presión diferencial para nivel, con sello separador en la cámara positiva, con indicador digital incorporado, extensión 50 mm. Características de la brida 3" clase 150. Alimentación 24 V CD y salida 4 a 20 mA rango 0 a 6000 mm de H ₂ O medio a medir masa cocida	Nivel de la Masa Cocida. (mm H ₂ O).	1
TT217 – TT218 Termómetro de resistencia PT100 con termo pozo y racor de fijación al termo pozo. Dn ½" Longitud de inmersión 250 mm. Temperatura 120 °C	Temperatura de la masa cocida, °C) (Temperatura del vapor °C)	2
DT200 Sensor de microondas con bridas DN65. Presión 10/16 bar, diámetro interior 40 mm. Sensor de temperatura (pt100) integrado con cable de 2.5 m. Tipo de sensor A Rango de medición de brix (mínimo/medio/máximo) 1,28646 g/cm ³ (60 °Brix) /1,41172 g/cm ³ (80 °Brix) /1,53716 g/cm ³ (98 °Brix). Todos los valores referidos a 20 grados Celsius Ref. pro/M/tec μ-ICC 2.45 No. de parte I S 065/06-100/045 ^a + Modulo de microondas μ-ICC 2.45, en gabinete de aluminio Protección IP65 dimensiones 166 x 100 x 81 mm conexión hacia la unidad de evaluación con cable coaxial RG58 de 10 mts de largo enchufe TNC. Conexión hacia el sensor de microondas con cables de 2 x 1,5 m Enchufe N. Ref. Pro/M/tec μ-ICC 2.45 No. de parte ICC MO ST	Concentración de la masa cocida. (°Brix.)	1
Válvula de bola; Diámetro nominal Dn 50, presión nominal: Pn 16 a 40 bar. Accionamiento de dos posiciones (ON/OFF). Para servicio en semillamiento al tacho medio a regular mezcla de cristales de azúcar y alcohol. Conexión por bridas; Kvs 255; cuerpo de acero inoxidable	DCV208	1

**Propuesta de automatización del tacho cristalizador de azúcar crudo del central Francisco
Antonio Rosales Benitez**

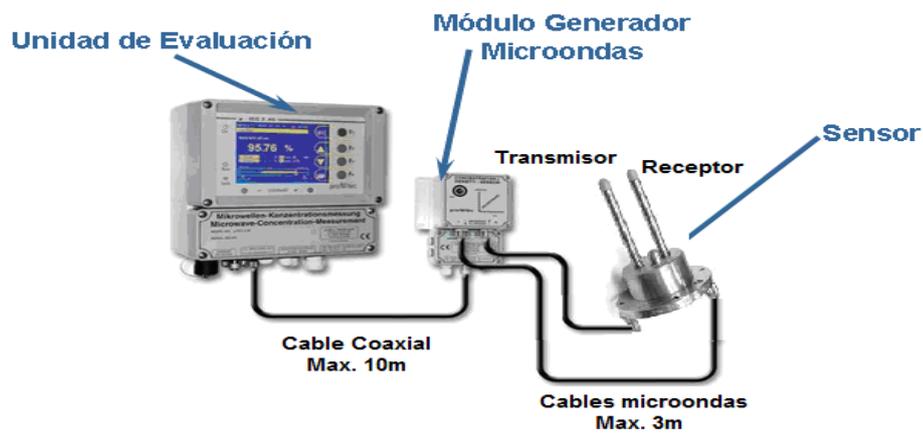
Descripción	Variable	Cantidad
1.4408. Actuador neumático rotativo SAMSON serie AT Tipo AT-301 S12. Simple efecto		
Válvula de mariposa; Tipo wafer Dn 203,20 mm Pn 16 accionamiento de dos posiciones (ON/OFF). Para servicio de vacío en el tacho. Cuerpo de fundición GGG-50. Mariposa Inox 1.4408. Eje Inox. AISI 304. Elastómero en Silicona HT conexión brida ISO F07/11 Ref. SAMSON Serie TT. Actuador neumático rotativo doble efecto	VMD209 VMD204	2
Válvula de mariposa, Tipo wafer Dn 203,20 mm Pn 16 accionamiento de dos posiciones (ON/OFF). Para servicio en meladura y mieles. Cuerpo de fundición GGG-50. Mariposa Inox 1.4408. Eje Inox. AISI 304. Elastómero en Silicona HT conexión brida ISO F07/11 Ref. SAMSON Serie TT. Actuador neumático rotativo doble efecto	VMD205 VMD206 VMD207	3
Válvula de guillotina de mando a distancia Dn 400 mm Pn 10 bar presión de alimentación 4 bar, con válvula de solenoide de 5 vías. Alimentación eléctrica 220 V y 60 Hz con finales de carrera TCR, con dos finales de carrera 1NA, 1NC. Ref. Para servicio en descarga del tacho de azúcar. Temperatura 100 °C	VMD210	1
Válvula reguladora de mariposa, Tipo wafer NA Dn 300 mm Pn 16 característica igual porcentaje. Medio a regular: vapor saturado. Cuerpo de fundición GGG-50. Mariposa Inox 1.4408. Eje Inox. AISI 304. Elastómero en Silicona HT Ref. SAMSON Serie TT. Actuador neumático rotativo simple efecto. Con posicionador electro neumático montado en la válvula entrada 4 a 20 mA	PCV 203	1
Válvula reguladora de mariposa, Tipo wafer NA Dn 203,20 mm Pn 16 característica igual porcentaje. Medio a regular: agua a 35 °C. Cuerpo de fundición GGG-50. Mariposa Inox 1.4408. Eje Inox. AISI 304. Elastómero en Silicona HT Ref. SAMSON Serie TT. Actuador neumático rotativo Simple efecto	PCV 201	1
Válvula de obturador rotativo tipo wafer. Diámetro nominal	PCV 201	1

Descripción	Variable	Cantidad
Dn 101,60 mm, presión nominal: Pn 16 bar, normal cerrada (NC Aire abre). Medio a regular: meladura y mieles a 60 °C flujo máximo: 30 ton/h. Cuerpo de acero al carbono 1.0619. Con posicionador electro neumático montado en la válvula entrada 4 a 20 mA		
Válvula de obturador rotativo tipo wafer. Diámetro nominal Dn 40 mm, presión nominal: Pn 16 bar, Normal cerrada (NC Aire abre) Medio a regular: agua a 80°C Flujo máximo: 20 ton/h. Tipo 72.4 AT Con posicionador electro neumático montado en la válvula Entrada 4 a 20 mA	DCV211	1
Manómetro indicador. Diámetro de la carátula 150 mm Conexión radial NPT 1/2" Rango 0 a 2.5 Kg/cm ² y Lbs/pulg ²	PI203	1
Vacuómetro indicador. Diámetro de la carátula 150 mm Conexión radial NPT 1/2" Rango 0 a 30 Pulg de Hg	PI201	1
Termómetro bimetálico con termopozo. Diámetro de la carátula 150 mm. Rango 0 a 200° C. Longitud de inmersión: 250 mm. Conexión al proceso: 1/2" NPT-M Ref. NUOVA FIMA Mod. TB 819	TI217 TI218	2
Indicador Visual del Nivel	LI 216	1
Presostato	PSL 201	1

(Ver anexo 3 ,5,6).

2.6 Sensor de microondas (transmisor de densidad)

El sensor de microondas “**μ-ICC 2,45 Standard**” es un sistema robusto y flexible. Por defecto está compuesto fundamentalmente por 3 elementos principales: la unidad de evaluación, el módulo microondas y el sensor. Esta configuración puede ser ampliada fácilmente hasta un total de cuatro sensores para cuatro puntos de control con una sola unidad de evaluación. El sistema tiene incluido un sensor de temperatura para medir la temperatura del producto (Fig. 4) [9].



(Fig. 4). Sensor de microondas

1. Unidad de evaluación

La unidad de evaluación es el controlador de los sensores y puede controlar de uno a cuatro sensores, es decir, hasta cuatro puntos de control. En la pantalla se puede ver los valores de las medidas como concentración, densidad, humedad u otras unidades de concentración, con la correspondiente temperatura del proceso. Todos los valores de medición están disponibles en formato digital a través del interfaz RS232. El valor de medida principal de concentración es transmitido al sistema de control de procesos a través del interfaz 0/4mA a 20mA. Se recomienda ubicar la unidad de evaluación dentro de un gabinete abierto, debido a que el calor que genera es considerable.

2. Módulo generador microondas

La electrónica microondas está completamente montada en un extraordinario módulo microondas compacto, el cual es instalado próximo al sensor. El módulo microondas es alimentado eléctricamente a partir de la unidad de evaluación a través de un cable coaxial el cual también es responsable de la transmisión digital de los datos de medida entre el módulo y la unidad de evaluación. Se puede instalar en la pared del tacho, es recomendable colocarlo sobre un soporte que impida el contacto directo del módulo con el calor del tacho.

3. Sensor

Los sensores de inserción con 2 sondas conectadas en un casco con brida se utilizan para ser implementadas en el fondo de un depósito, tanque, tacho, o

paredes de una tubería, el módulo microondas está directamente conectado con las sondas del sensor a través de los cables microondas.

4. Cables

Los cables microondas llevan la señal desde el módulo microondas al punto de medida y desde aquí nuevamente al módulo microondas. Estos cables están fabricados de acuerdo a la tecnología más reciente, y con el mejor apantallamiento para asegurar la menor pérdida de señal en su propagación en dichos cables.

2.6.1 Ventajas de la medición por transmisión de microondas

- La medición se realiza por transmisión, en línea de proceso, de forma continua y al instante.
- Es válida para aplicaciones en tubería de proceso como para tanques, depósitos o tachos.
- Es altamente representativa porque permite analizar una gran cantidad de producto en línea de proceso.
- Es independiente de impurezas o de sustancias extrañas pues solo es sensible a las moléculas de agua.

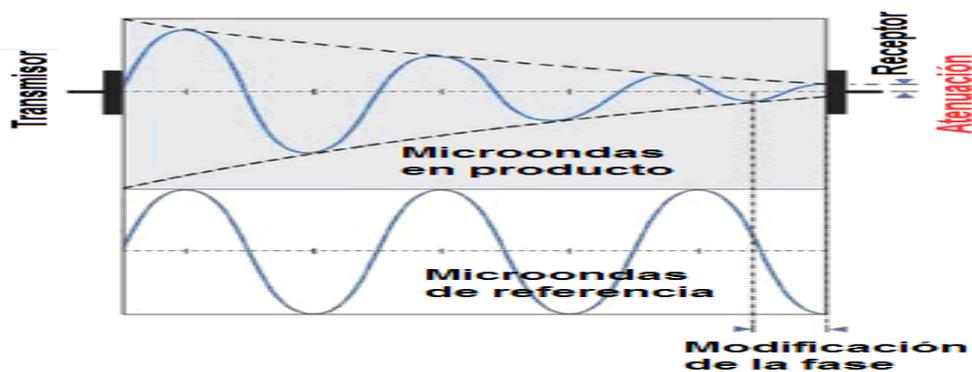
2.6.2 Principio de funcionamiento del sensor de microondas

La medición de concentración por transmisión de microondas se basa en la absorción de la radiación microondas por las moléculas de agua existentes en el producto a controlar. De este modo las microondas son ondas electromagnéticas emitidas por el transmisor que se propagan por el medio o producto, y son recogidas por el receptor. El cambio de fase que experimenta su reducción y velocidad de propagación o desfase respecto a una onda microondas de referencia, es debido a la densidad del producto que minimiza la amplitud o atenuación de la misma. En ambos casos proporcional a las moléculas de agua existentes en el medio de propagación y por tanto directamente proporcional a la concentración, ver la siguiente (Fig. 5). A partir de ello, el sistema de medida “ μ -ICC 2,45 Standard” determina el valor de concentración, contenido en agua,

densidad o materia seca presente en cualquier líquido, pasta o suspensión; por lo que es válido para multitud de aplicaciones industriales.

Aplicaciones más destacadas

- Industria Azucarera: en soluciones de azúcar de caña, azúcar de remolacha, refinado, melaza, jugo de azúcar diluido o saturado, lechada de cal. etc.
- Industria Alimentaria: producto lácteo, zumos de frutas, tomate, aceite de oliva, vino y café.
- Sector cervecero, Sector Papel, Sector del Hormigón, Sector Químico y Farmacéutico, Sector Depuración de Aguas y Biogás.



(Fig. 5). Comportamiento de las microondas en un producto

2.7 Configuración del autómata Mitsubishi Fx3u

El autómata a utilizar es de concepción modular, lo que significa que se le acoplan módulos de entrada/salida según la cantidad de señales a utilizar. En este caso en particular para la recolección de datos se utilizaron los siguientes módulos:

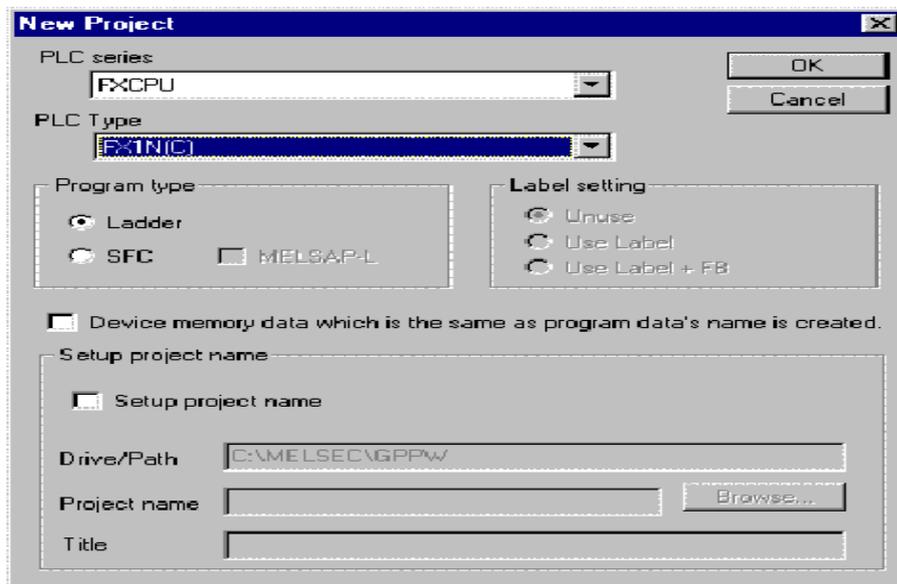
Tabla 7. Configuración del autómata

	Descripción	UM	Cantidad
1	Procesador central con 16 entradas digitales a 24V CD y 16 salidas digitales a relé. MOD: Fx3u-32MR/ES	U	1
2	Módulo de 8 entradas analógicas de (0-5V CD, 4-20mA CD, 0-10V CD). MOD: Fx2n-4AD	U	1

3	Módulo de 4 salidas analógicas de (4-20mA CD). MOD: Fx2n-4DA	U	1
4	Módulo de comunicación. MOD: Fx3u-ADP485	U	1
5	Módulo de comunicación para MODBUS RTU, convierte la norma RS485/RS422 a RS/232	U	1
6	Fuente de alimentación externa de 100 a 240V CA a 24V CD y 2.5A MOD: PSU-25	U	1
7	Batería para el autómata MOD: Fx3u-32MR/ES	U	1
Total			7

2.7.1 Software GX-Devolper-Fx utilizado en la programación del autómata

Para empezar un proyecto nuevo hay que clicar sobre la opción del menú principal "Project-New project...". Con esto se abrirá el siguiente formulario (Fig.6):



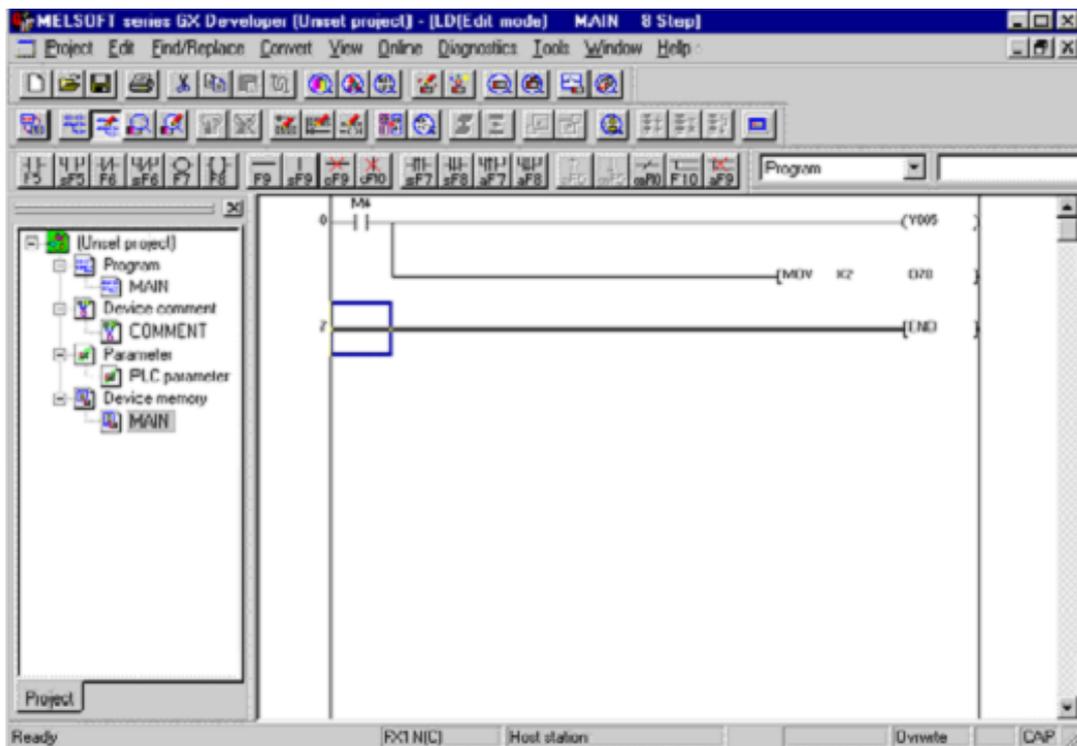
(Fig. 6). Creación de nuevo proyecto

A través de la opción PLC Series (1) se puede seleccionar la serie de PLC's con la que se va a trabajar. Con la opción PLC Type (2) se escogerá el modelo de CPU apropiado. Dentro de Program type (3) debe escogerse entre trabajar con

lenguaje de contactos (LADDER) o a través de diagrama de flujo SFC. La opción (4) sirve para crear directamente un archivo de dispositivos, con el que iniciar los valores de las variables (datos D y marcas de bit M). Si no se selecciona, tenemos la posibilidad de activarlo durante la ejecución del proyecto. Si se activa el Setup project name (5) tenemos la posibilidad de darle un nombre al proyecto, así cuando se quiera guardar el proyecto no será necesario teclear el nombre del archivo.

Entorno de programación:

Cuando se abre un nuevo proyecto aparece en la pantalla el entorno de programación. Es desde esta pantalla (Fig.7) donde debemos programar y configurar el autómata.



(Fig. 7). Entorno de programación

Edición de programa en lenguaje de contactos (ladder):

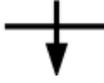
En la parte superior hay una colección de botones dedicados (Fig. 8) a la inserción de contactos y bobinas en la pantalla de edición. Se tiene la posibilidad de insertar componentes a través de estos botones, desde el menú general (Edit – Ladder symbol...) o con la utilización de teclas abreviadas.



(Fig. 8). Botones dedicados

Tabla 8. Simbología del lenguaje LADDER

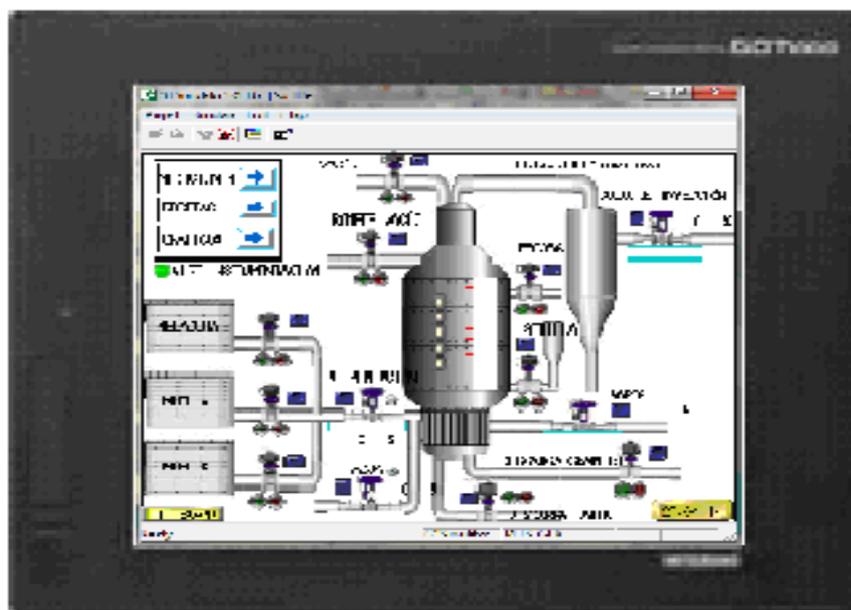
Nombre	Simbología
Contacto normalmente abierto	
Contacto normalmente abierto en paralelo	
Contacto normalmente cerrado en paralelo	
Bobina de salida	
Contacto en flanco ascendente	
Contacto paralelo en flanco ascendente	
Bloque para instrucciones	
Trazar rama horizontal	
Borrar rama vertical	
Contacto en flanco descendente	
Contacto paralelo en flanco descendente	
Negación de la lógica previa	

Trazar ramas con cursores	
Borrar trazado de ramas con cursores	
Activación por flanco descendente	
Activación por flanco ascendente	

(Ver anexo 4) con la programación del autómata.

2.8 Referencia a la terminal gráfica táctil GOT 100

Para la operación del sistema se empleará una pantalla táctil (OP) ubicada en el panel PM5, donde se podrá operar los distintos lazos automáticos y válvulas ON/OFF, además de visualizar las variables del sistema: (Fig. 9)



(Fig. 9). Terminal gráfica táctil GOT 100

Tabla 9. Característica de la terminal gráfica

	Descripción	UM	Cantidad
1	Terminal gráfica táctil 10,4 in; TFT 256 colores 640x480 píxeles; 24 V (CD) Mod. GOT 100 MITSUBISHI	U	1

Las terminales gráficas táctil GOT son extremadamente fáciles y cómodas de manejar, su capacidad se pone realmente de manifiesto cuando se usa en combinación con los controladores MELSEC de Mitsubishi Electric ya sea en PLCs compactos o sistemas modulares como la avanzada Interfaces Hombre-Máquina (HMI) para servomotores o variadores de frecuencia [10].

- Las pantallas de alta resolución con 256 o incluso 65.536 colores pueden representar también gráficos complejos.
- Gracias a sus funciones multimedia, es posible la ayuda con soporte de vídeos en caso de errores.
- Un rápido puerto USB en la parte frontal de las unidades con modo transparente para controladores, servomotores y variadores de frecuencia MELSEC.
- Con ayudas de tarjetas Compact Flash (CF) o de memorias USB es posible guardar y transportar datos de proyecto.
- Interfaces opcionales para Ethernet, MELSECNET/10H, CC-Link IE, así como RS232C y RS422 adicionales.

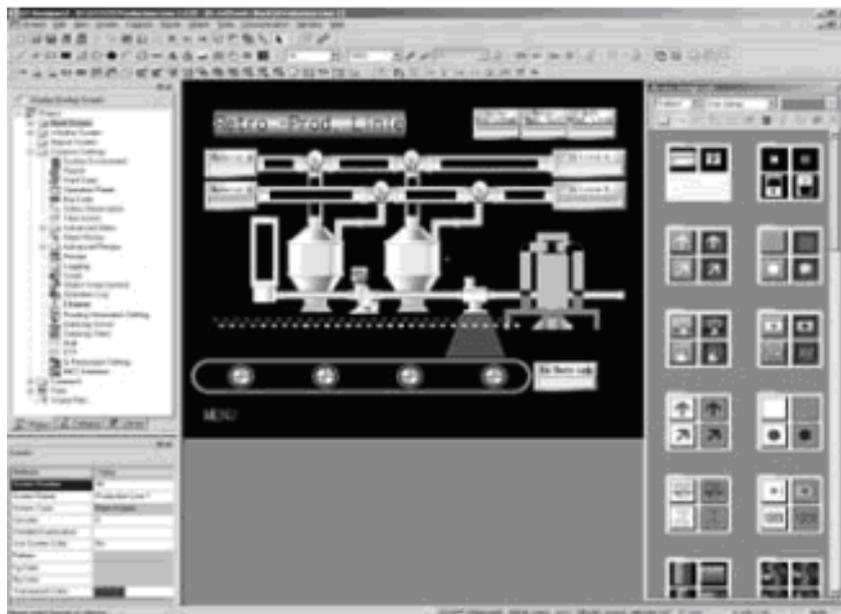
Modo de operación de la GOT

- Temperatura de operación: 0 – 55 °C
- Humedad relativa: 10 – 90% RH
- Debe instalarse en el interior de un panel de mando.
- Debe ubicarse de manera de que no esté en contacto con medios corrosivos, ni donde existan vibraciones ni en lugares donde pueda recibir un impacto que dañe su estructura o la pantalla.
- Voltaje de alimentación CD: 24 V
- Frecuencia de trabajo: 50/ 60 Hz

2.8.1 Software GT Designer3 utilizado en la configuración de la pantalla táctil

Para la programación de la serie GOT se dispone del software de programación GT Designer3, el cual puede trabajar en cualquier PC estándar con un sistema Windows. Mediante el programa de edición gráfica GT Designer3 es posible crear las pantallas de operación para todas las consolas de GOT. Con la ayuda de la sencilla interfaz Windows, se capacita al usuario para operar el programa de forma rápida y fácil, sin largos intervalos de procesamiento y costes de trabajo. El paquete de software consta de los siguientes elementos:

1. Una biblioteca gráfica de objetos exhaustiva y editable que permite una adaptación rápida e individualizada de los gráficos existentes a la aplicación que se necesita. Una estructura en forma de árbol de los proyectos que facilita la visión fácilmente general y rápida. Así es posible navegar fácilmente por el proyecto y añadir pantallas, borrarlas o modificarlas. De esta forma se crea una secuencia de programación lógica e intuitiva.
2. La combinación de simulador GT y simulador GX ofrece la posibilidad de uso en la consola de mando de la máquina, así como de comprobar exhaustivamente el programa del PLC sin tener conectado el hardware correspondiente. (Fig. 10).



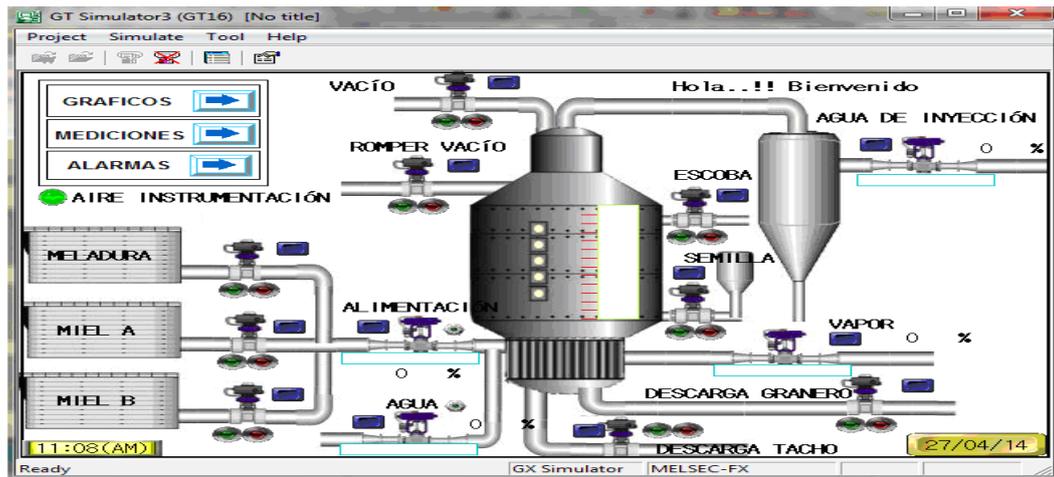
(Fig. 10) Configuración de la terminal grafica con GT Designer3

2.9 El Sistema de supervisión

En el Nivel Supervisorio se utilizará el software de supervisión EROS, que trabaja en ambiente Windows, el cual permite, tanto las lecturas de las mediciones; como los estados de funcionamientos de válvulas, así como el trabajo con los lazos de regulación (cambios en el Set Point, constantes, modo de operación manual o automático, etc.)

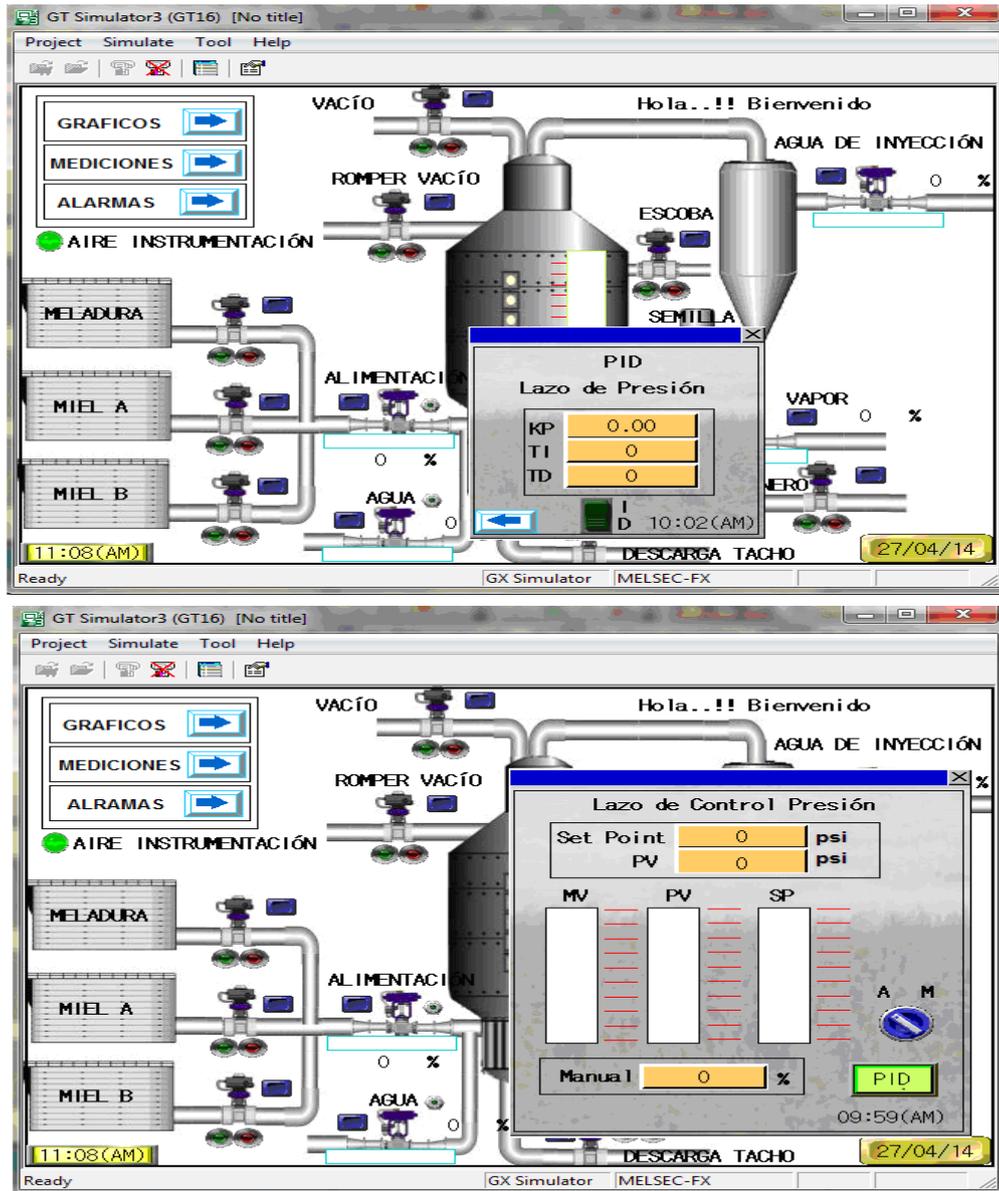
El EROS es el sistema de supervisión y control de procesos que se destaca por la facilidad con que puede ser operado y configurado. Ofrece funciones predeterminadas (estadísticas, alarmas, recetas y datos históricos), lo que disminuye los costos de puesta en marcha. Posee una capa de red poderosa que a través del protocolo TCP-IP, habilita la comunicación entre diferentes computadoras y permite la operación remota. Actualmente se conecta con servidores OPC, redes MODBUS y autómatas.

Es un potente registrador histórico que permite visualizar y analizar la información de todas las variables que se configuran de forma sencilla y en línea, lo que permite que un usuario no especializado con orientaciones sencillas pueda configurarlo sin tener que depender de especialistas para ello. Su ambiente de trabajo es amistoso y la presentación es agradable, nos brinda un conjunto de posibilidades que lo hacen sumamente robusto y flexible para todos los requerimientos de este trabajo. Este permite un número prácticamente ilimitado de variables, además todas las señales tanto analógicas como digitales que son procesadas por el autómata son visualizadas en la pantalla de la PC y el OP. Los mímicos posibilitan visualizar las variables y la interacción física de los diferentes elementos del proceso, pueden ejecutarse comandos para el control manual o régimen de operación automático. Para realizar cambios de parámetros y acción de reguladores el operador con solo pulsar en la pantalla de la PC y el OP los íconos designados para ello puede monitorear y controlar el proceso. A continuación, se muestra la configuración de la pantalla táctil y del SCADA EROS de la PC del tacho cristalizador. (Fig. 11)

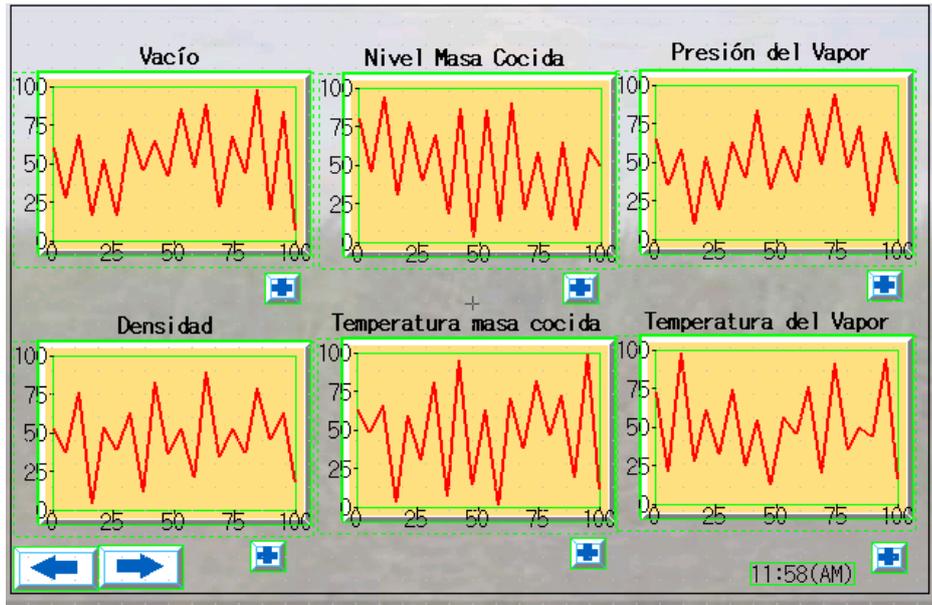


(Fig. 11). Visualización del EROS

Desde esta pantalla inicial se tiene acceso a los diferentes lazos de control, con solamente pulsar en el mímico diseñado (botón azul) se despliega la ventana configurada con las siguientes opciones: Set Point, variable manipulada, variable del proceso, y el modo de operación manual o automático. Desde la misma podemos acceder al controlador PID implementado en el programa del PLC a través del **botón verde**, para ajustar los parámetros del controlador (KP, TI y TD), (Fig. 12). Además, podemos ver la respuesta del mismo durante su comportamiento en tiempo real con solo pulsar el **botón de gráficos** diseñado para este objetivo (Fig. 13).

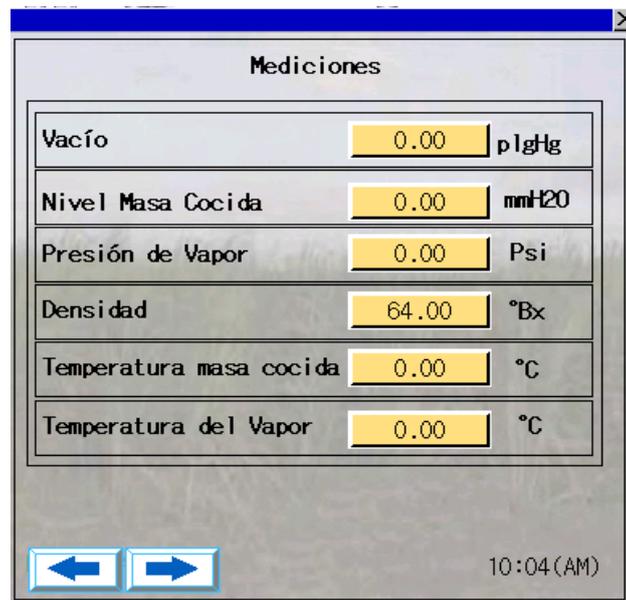


(Fig. 12). Funcionamiento del mímico



(Fig. 13). Gráficos de comportamiento

Mediante el **botón mediciones** podemos visualizar de manera rápida y directa el comportamiento de todas las mediciones del campo. (Ver figura 2.13)



(Fig. 14). Mediciones

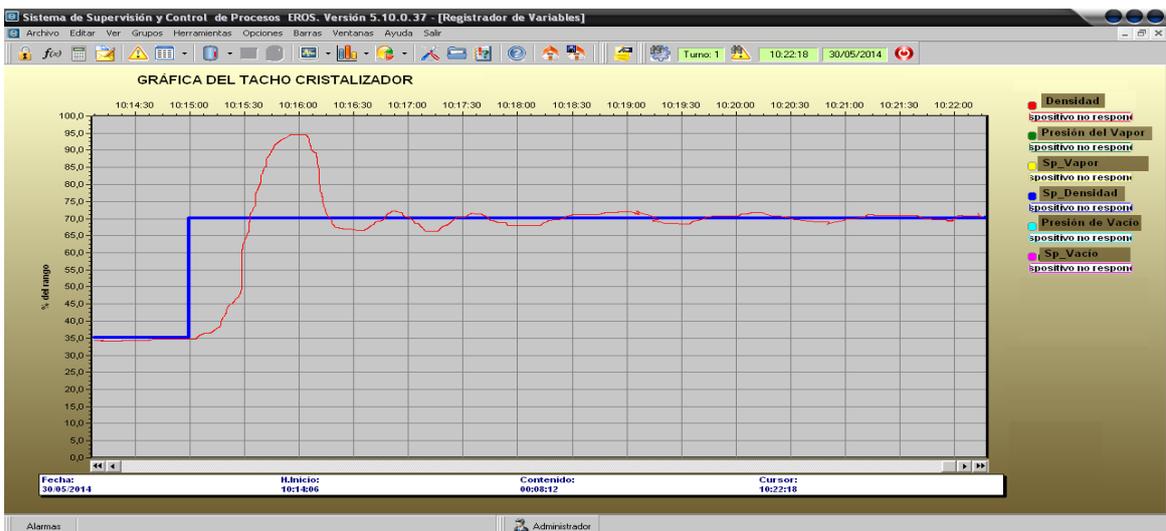
El sistema tiene concebido señales de alarmas que se visualizan con una franja de color rojo sobre la pantalla inicial. Estas se activan cuando hay alguna medición fuera del rango de trabajo o nivel crítico de operación, las mismas tienen una ventana diseñada para que el operador tenga acceso a su configuración.

(Fig. 15) Todas estas opciones son operables y configurables en dependencia de la necesidad que se tenga para el control del proceso.



(Fig.15). Alarmas

Desde el supervisorio EROS podemos ajustar el lazo de control por la vía experimental o a prueba y error, se grafica el Set Point con la variable del proceso introduciendo valores de inicio a Kp, TI y TD para ir ajustando, y vamos observando en la gráfica el comportamiento de las oscilaciones que no es más que el error entre el Set Point y la variable del proceso, buscando siempre que el error sea mínimo en el estado estacionario (Fig. 16).



(Fig. 16). Ajuste del lazo de control

2.10 Análisis económico

De acuerdo a las evaluaciones realizadas en otras industrias, se ha demostrado que como resultado de la aplicación de técnicas de automatización se obtienen beneficios económicos, operacionales, de seguridad y calidad en el proceso de producción. En la siguiente tabla (Tabla 10) se muestra el presupuesto estimado de la inversión para el tacho cristalizador, en el cual se implementará la automatización de su proceso de producción. El análisis se realizó mediante el uso del programa Microsoft Office Excel® 2020.

Tabla 10. Resumen del análisis económica

Área de automatización: Tacho cristalizador		
Clasificación	Valor USD	Valor MN
Instrumentación	\$ 5,874.09	\$ 704,890.80
Elemento de acción final (EAF)	\$ 22,182.72	\$ 2,661,926.40
Aparellaje	\$ 1,501.74	\$ 180,208.80
Configuración del sistema de control	\$ 4,986.79	\$ 598,414.80
Materiales de Montaje	\$ 5,792.45	\$ 695,094.00
Instrumentación Local	\$ 345.70	\$ 41,484.00
Estudios e Investigaciones	\$ 0.00	\$ 3,500.00
Proyecto	\$ 0.00	\$ 12,350.00
Programación	\$ 0.00	\$ 7,000.00
Asesoría y Puesta en marcha	\$ 0.00	\$ 1,500.00
Adiestramiento	\$ 0.00	\$ 2,100.00
Montaje	\$ 0.00	\$ 153,640.00
Total General	\$ 40,683.49	\$ 5,062,108.80

Tomando en cuenta que las zafras se desarrollan en un **periodo de 100 días**, y el central tiene una capacidad de molienda de 2645 T/días y asumiendo que se aproveche un 65 % de su capacidad potencial que con un rendimiento de 7 % en base 96 %, se producen en el día 120 T/días de azúcar. Teniendo en cuenta el precio actual de la tonelada de azúcar es de \$11133,83.

$$\text{Producción del central} = 120 \frac{T}{\text{días}} * 100 \text{ días} = 12000 T$$

$$\text{Total generado por zafra} = 12000 T * 11133.83 \frac{\$}{T} = \$133605960$$

$$\text{Periodo de Recuperación} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Total generado}} = 0,82\%$$

$$\text{Total de recuperación} = \frac{\text{Total de inversión}}{\text{Periodo de recuperación}} = \$6173303,41$$

$$\text{Ganancia de inversión} = \$1111194,61$$

CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se lograron cumplir los objetivos propuestos para la automatización del tacho cristalizador en la EAA Francisco Rosales Benites de Santiago de Cuba:

- ✚ Con la caracterización del proceso se arribó a la necesidad de implementar un proyecto de automatización para mejorar la eficiencia y calidad en la cristalización.
- ✚ Para la obtención de una templa que cumpla con los requisitos de calidad se definió como variables críticas la densidad, presión absoluta, el nivel del tacho y la presión de vapor en la calandria.
- ✚ Se diseñó la estrategia de control empleando el PLC FX3U, de la familia de automata Mitsubishi
- ✚ Se programaron las secuencias establecidas para el control de las variables más importante del proceso, con la ayuda de la función PID implementada en el autómata Mitsubishi FX3U, la cuál se utiliza como regulador principal.

RECOMENDACIONES

- ✚ Implementar la estrategia de supervisión y control SCADA en el tacho de cristalizador.
- ✚ Empezar en una segunda etapa la automatización del resto del proceso en el área de tachos, integrado al Sistema de Control y Supervisorio.
- ✚ Hacer más amplia la modernización de este central, en la medida de las posibilidades técnicas y económicas.

BIBLIOGRAFIA

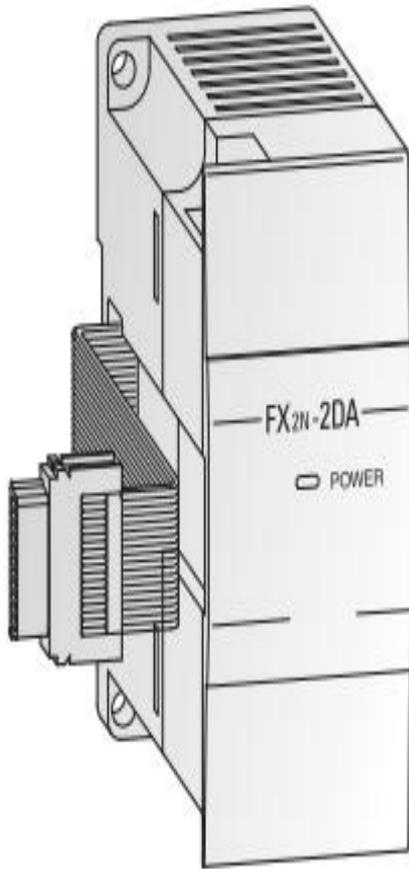
- [1] COPEXTEL, «No.4- El edificio inteligente: desafío de la Arquitectura y la Automática», jul. 2014, Accedido: 5 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://10.22.1.21:8080/jspui/handle/123456789/2706>
- [2] A. Ladanyuk, V. Kyshenko, E. Shkolna, y M. Sych, «Development of the algorithm of determining the state of evaporation station using neural networks», *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 5, n.º 2 (83), Art. n.º 2 (83), oct. 2016, doi: 10.15587/1729-4061.2016.79322.
- [3] J. A. Clark y F. G. López, *El proceso de fabricación de azúcar crudo en los tachos*. Instituto del Libro, 1970.
- [4] «Libro Manual Ingeniero Azucarero - E_HUGOT», toaz.info. Accedido: 31 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://toaz.info/doc-view-2>
- [5] A. Santamaría, «Supervivencia y transformación de la industria azucarera en el este de Cuba al final del siglo XIX», *América Lat. En Hist. Económica*, vol. 30, n.º 1, abr. 2023, doi: 10.18232/20073496.1228.
- [6] colectivo de autores, «“Autómatas Programables, Fundamentos, Manejos, Instalación y Prácticas”.» 1999.
- [7] I. Loyola Zubia, «“Curso Básico de Autómatas Programables”». Grupo Tecnológico, 2007.
- [8] «Manual de Introducción FX3U.pdf».
- [9] «SENSORES MICROONDAS PARA MEDICIÓN BRUX». 2010.
- [10] «Sistemas de automatización industrial | Productos y soluciones», MITSUBISHI ELECTRIC MÉXICO. Accedido: 1 de noviembre de 2023. Disponible en: <https://mx.mitsubishielectric.com/es/products-solutions/factory-automation/index.html>

ANEXOS

Anexo 1. Descripción de los accesorios de la serie FX3-U

Función	Descripción
Conexión para adaptador de tarjetas	En esta interfaz se pueden aplicar adaptadores de ampliación opcionales. Los adaptadores están disponibles para todas las series FX (con excepción de FX2NC) en diferentes diseños y ofrecen al equipo base ampliaciones adicionales o interfaces de comunicación. Los adaptadores pueden insertarse directamente en la entalladura.
Conexión para equipos de programación	En esta conexión se puede conectar el equipo de programación manual FX-20P-E o un PC/computador portátil externo con software de programación (p. ej. GX Developer/FX).
EEPROM	Memoria de escritura/lectura en la cual se escribe o lee el programa de trabajo a través del software de programación. Estas memorias son memorias fijas que mantienen su información incluso en caso de interrupción de tensión, por lo cual no requieren un tamponaje de batería.
Ranura disponible para tarjeta de memoria	En esta ranura se pueden insertar las tarjetas de memoria opcionalmente disponibles. Mediante inserción de estas tarjetas se desactiva la memoria interna del control y se procesa exclusivamente el programa contenido en la tarjeta de memoria respectiva.
Bus de ampliación	En este bus de ampliación, junto a los equipos adicionales de ampliación de entrada y salida, se pueden conectar también módulos especiales para la ampliación del sistema de PLC. Una vista sinóptica respectiva se encuentra en el Cap. 6 de este manual.
Potenciómetros analógicos	Con los potenciómetros analógicos se pueden definir los valores nominales. El ajuste respectivo se consulta a través del programa y se utiliza para los temporizadores, emisión de impulsos, etc.
Fuente de tensión de servicio	La fuente de tensión de servicio (excepto FX2nc) suministra una tensión continua regulada de 24 V para la alimentación de las señales de entrada y de los sensores. La capacidad de carga de esta fuente de tensión depende del tipo de control (p. ej. FX1S y FX1N: 400 mA, FX2N-16M□-□□ a FX2N-32M□-□□: 250 mA, FX2N-48M□-□□ a FX2N-64M□-□□: 460 mA)
Entradas digitales	A través de las entradas digitales se registran las señales de control de los interruptores, teclas o sensores conectados. Se pueden registrar los estados CON (tensión aplicada) o DESC (tensión no aplicada).
Salidas digitales	En las salidas digitales pueden conectarse componentes de regulación y actores, en función de la aplicación y del tipo de salida.
LEDs para estados de entrada	A través de los LEDs para los estados de entrada se puede indicar la entrada en la cual se aplica una señal, o sea, una tensión definida. Cuando se enciende el LED correspondiente, se aplica una tensión y por lo tanto una señal de control en la entrada, y se activa la entrada.
LEDs para estados de salida	Los estados de salida, o sea, el estado de activación o desactivación de una salida, se señalizan a través de los LEDs. Las salidas del control pueden conmutar diferentes tensiones en función de su tipo y modo.
LEDs para indicación del estado operacional	Los LEDs „RUN“, „POWER“ y „ERROR“ identifican el estado operacional actual del PLC e indican si está activada la tensión de alimentación (POWER), si el PLC está procesando el programa almacenado (RUN) o bien si se ha generado un fallo (ERROR).

Anexos. 2. Módulo de salida analógica



Especificaciones		FX2N-4DA
Canales analógicos	entradas	—
	salidas	4
Rango analógico de salida		-10—+10 V DC / 0—+20 mA / 4—+20 mA
Resolución	Tensión	5 mV (10bit)
	Corriente	20 μ A (11 bit signo +)
Precisión total escala completa		\pm 1 %

Rango de operación de 0 a 55°C.

Resolución para señales de salidas analógicas de -10 a 10 vcd: -2000 a 2000

Resolución para señales de salidas analógicas de 0,4 a 20 mA: 0 a 1000

Anexo.3 Instrumentación propuesta en el campo



Transmisor Smart de Presión



Transmisor Smart de presión para nivel



Válvula de bola



Válvula de mariposa



Válvula reguladora de mariposa



Válvula de guillotina



Válvula obturador



Indicador de nivel



Manómetro Indicador



Vacuómetro

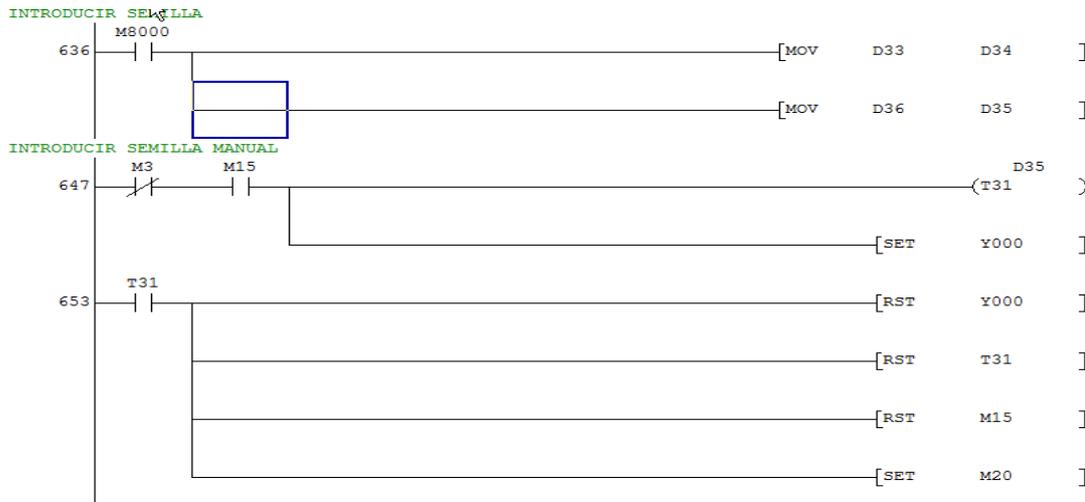


Termómetro bimetalico

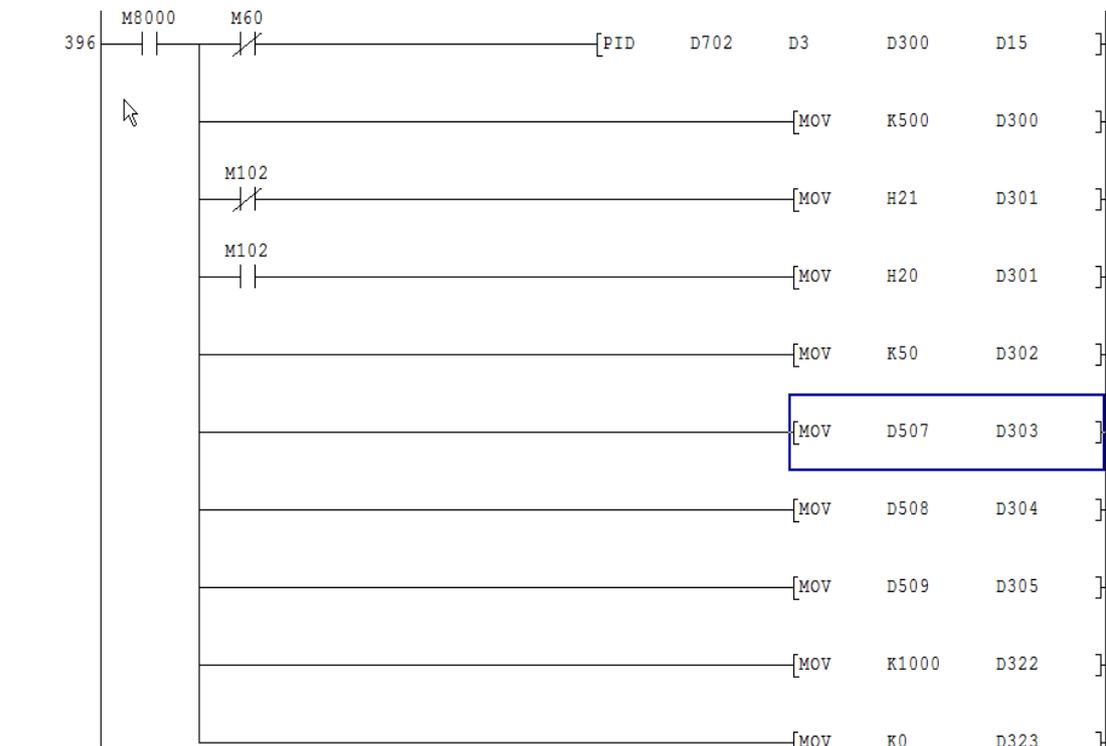


Presostato

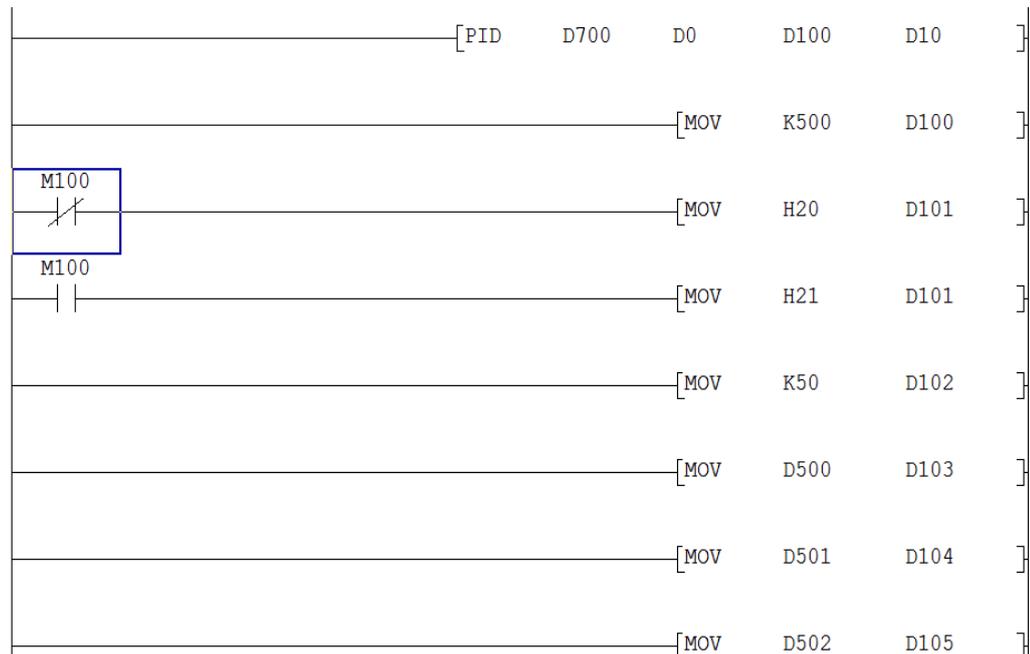
Configuración para introducir el cristal 600



Configuración del lazo de control PID de alimentación al tacho



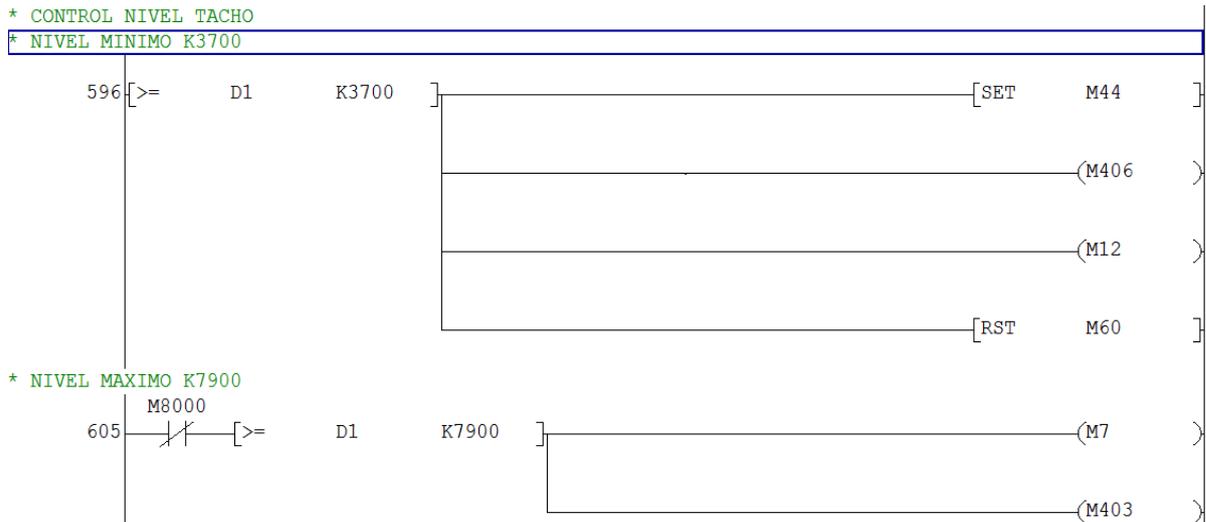
Configuración del lazo de control PID (Presión de Vapor en la calandria)



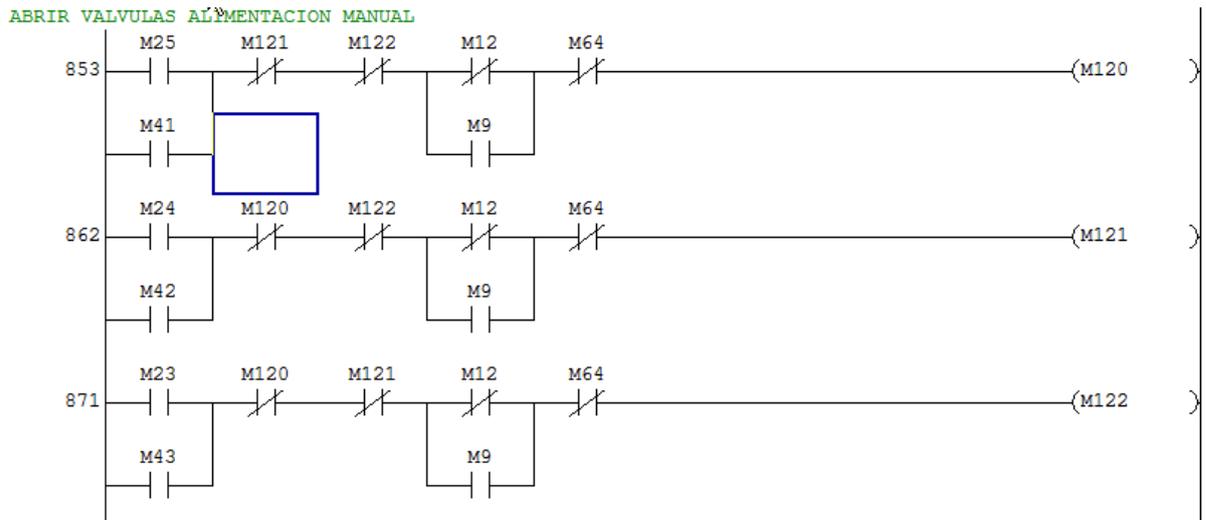
Configuración del lazo de control PID de la Presión Absoluta (Vacío)



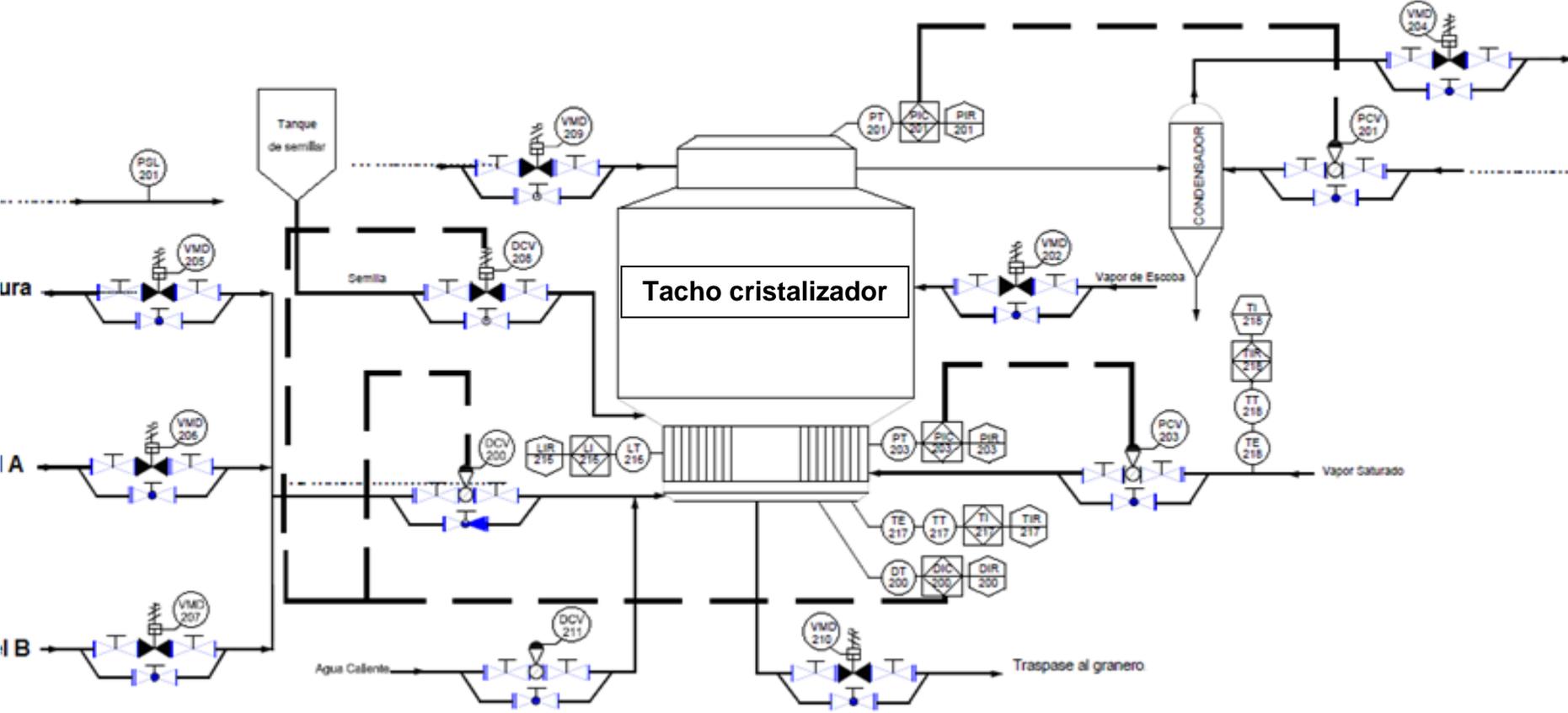
Control de nivel en el tacho



Válvulas de alimentación manual



Anexo 5. Esquema funcional con la instrumentación propuesta en norma ISA. Entradas/Salidas Analógicas



Anexo 6. Esquema funcional con la instrumentación propuesta en norma ISA. Entradas/Salidas Digitales

