

INTRODUCCIÓN

En muchas plantas industriales existen gran cantidad de variables que deben mantenerse en un valor determinado y para lograr este objetivo se requeriría una gran cantidad de operarios. Por ello, una solución sería realizar el control de éstas variables de manera automática, ya que de esta forma se lograría el control sin necesidad de la intervención de operadores.

Los procesos automatizados han brindado facilidades a las empresas para que continúen siendo competitivas en el mundo globalizado de hoy, ya que presentan muchas ventajas, entre ellas está que el control de los procesos productivos es realizado por un programa computarizado, además, así es más fácil y rápido detectar y corregir fallas. La supervisión del sistema se lleva a cabo en computadoras que muestran al proceso de manera gráfica, estado de las variables críticas, estadísticas y tendencias necesarias. Cuando alguna variable se sale de rango, el sistema es capaz de tomar acciones para corregir la situación anormal, similar a la decisión que algún operador ejecutaría en un proceso de control manual.

Las plantas industriales automatizadas deben proporcionar en sus sistemas, alta confiabilidad, gran eficiencia y flexibilidad. Entonces, se puede decir que las razones de la automatización de las plantas de proceso son proporcionar un entorno seguro y a la vez mantener la calidad deseada del producto además mantener una alta eficiencia de la planta con reducción de la demanda de trabajo humano. Una de las bases principales del control automático es un dispositivo electrónico llamado Controlador Lógico Programable (PLC), el cual posee funciones especiales para el control de procesos desde los más sencillos hasta los más complejos.

En el proceso de elaboración de la pasta corta se debe mantener en determinado valor de operación las variables del mismo, como los son la temperatura, la humedad, la velocidad y tiempo de secado, además de mantener la calidad del producto, en un nivel continuo y con un costo mínimo.

Por todas estas razones, la empresa Pastas Capri C.A. decidió implementar un sistema automatizado utilizando un (PLC) para controlar las variables de temperatura

y humedad involucradas en la línea de producción número tres (3), convirtiéndose en un sistema más flexible a las necesidades del proceso y seguro. En este trabajo se diseñará completamente dicho sistema de control, incluyendo la programación instalación, arranque y puesta a punto del mismo. Para alcanzar los objetivos planteados se realizaron las siguientes actividades referentes a ingeniería conceptual para analizar el sistema de control y así elaborar un diagnóstico e ingeniería de detalles donde se ejecutaron las actividades referentes a las disciplinas de:

- Levantamiento de campo para determinar el estado actual de las instalaciones y elaborar un informe general del sistema de control utilizado inicialmente.
- Instrumentación referida al sistema de control que se instaló.
- Aplicación para establecer las estrategias de control del nuevo sistema.
- Sistemas para seleccionarlas señales que intervendrían en el nuevo sistema, su clasificación y su variable asociada para elaborar el programa de control.
- Eléctrica para la canalización del cableado de las señales del nuevo sistema de control.
- Especificaciones generales para la construcción del sistema y pruebas para verificar el funcionamiento del mismo.

Luego de instalar todos los elementos del nuevo sistema de control y programar el PLC, se comparó el comportamiento de este sistema con el anterior, verificando que el nuevo es mucho más eficiente. La corrida del programa fue satisfactoria así como la producción obtenida durante la prueba. Es importante destacar que el PLC instalado además de ser utilizado para el arranque y control de las etapas de secado puede programarse para automatizar otros procesos que se hacen actualmente de forma manual dentro de la línea de producción.

CAPITULO I

I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para elaborar industrialmente la pasta corta se utiliza la sémola de trigo durum, que proviene de silos. Esta es amasada con agua en una prensa de forma que la pasta no contenga burbujas y sea homogénea y brillante. Luego de amasada se hace la extrusión de la pasta a través del molde para darle la forma deseada y después se envía a un equipo para su primer presecado, seguidamente la pasta pasa al primer secador para el presecado, después al segundo y tercer secador que es la etapa de secado y posteriormente pasa a la etapa de estabilización o enfriamiento en el cuarto secador. Por ultimo pasa a los silos de almacenamiento temporal para esperar el empaquetado, enfardado y distribución.

Todas las etapas de secado son muy importantes ya que la pasta debe secarse desde la parte interna por etapas hasta secarse finalmente en su capa externa y así garantizar la calidad de la misma. Por ello, es especialmente importante controlar los parámetros de temperatura y humedad en cada etapa de secado para obtener la humedad relativa requerida, evitar el resquebrajamiento del producto final y así cumplir con el control de calidad.

Hasta no hace mucho tiempo el control de procesos industriales se venía haciendo de forma cableada por medio de contactores y relés, siendo muy complicada, poco flexible y con funciones limitadas. Al operario que se encontraba a cargo de este tipo de instalaciones, se le exigía tener altos conocimientos técnicos para mantener y realizar el control.

En términos generales, los procesos productivos modernos cuentan con sistemas mecánicos, hidráulicos, neumáticos y de control automatizado; este último se encarga de coordinar, con precisión y exactitud, la operación del sistema mecánico y así fabricar el producto para el cual fue diseñado.

En la línea de producción número tres (3) de la empresa pastas Capri C.A. se elaboran varios formatos de pasta corta, la cual presenta el inconveniente que en las etapas de secado de la pasta, el control de las variables temperatura y humedad relativa se hace de forma manual. Las fallas se detectan observando y palpando el producto en cada salida de los secadores y los parámetros antes mencionados se ajustan mediante la manipulación manual de válvulas.

Un estricto control de las variables que forman parte del proceso de secado: temperatura y humedad relativa del aire, y velocidad de circulación del mismo, son imprescindibles para obtener un producto de calidad y homogéneo. Hoy en día los sistemas de regulación, control y mando, ofrecen la posibilidad de regulaciones muy finas que permiten poder ofrecer sistemas muy seguros y versátiles.

En este trabajo se diseñará un sistema de control para las variables temperatura y humedad de la etapa de secado de la producción de pasta corta, utilizando un Controlador Lógico Programable (PLC), el cual, incluye la programación, instalación arranque y puesta a punto del mismo.

La automatización y el control de todos los parámetros de funcionamiento de la línea estarán dirigidos por el PLC, pero el enfoque se hará únicamente a los parámetros de control temperatura y humedad relativa en las diferentes etapas de secado de la pasta.

En cuanto a los instrumentos, solamente se hará referencia a los del tablero de control y si se considera indispensable se hará referencia a los instrumentos de la parte mecánica de la línea.

I.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

I.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, programar, instalar, arrancar y poner a punto un sistema de control de la temperatura y la humedad para una línea de producción de pasta corta, mediante un Controlador Lógico Programable (PLC).

I.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la estrategia para modificar el sistema de control actual, definiendo las variaciones de instrumentación que deben hacerse para la instalación del nuevo sistema.
- Programar el software del control PID de temperatura y humedad, para cada secador de tambor rotatorio.
- Dirigir el montaje y canalización de todos los elementos del nuevo sistema de control.
- Arranque y puesta a punto del nuevo sistema de control.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

II.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA PASTA

Este proceso se inicia con la recepción de la materia prima en silos, que en este caso es la sémola de trigo durum. Posteriormente, dicha sémola es pasada a través de un plansister (equipo donde se elimina cualquier objeto contaminante sólido), que pudiese estar contenido en la sémola, luego es amasada con agua en una prensa agregando un tercio de agua por dos tercios de sémola.

El amasado de la sémola se hace en dos partes: un empastado, donde se hace la mezcla homogénea de agua y sémola, con el fin de obtener el gluten y otra donde se amasa en un sistema de vacío, el cual tiene como objetivo, evitar que se formen burbujas internas que disminuyan la durabilidad de la pasta además de mejorar su aspecto haciéndolo brillante.

Una vez amasada la mezcla agua-sémola se pasa al proceso de extrusión en el cual a través de un tornillo sin fin, la masa toma forma ya que el tornillo sin fin empuja la masa a través de las terrajas de un molde de bronce donde se da la forma deseada y aquí un cuchillo rotativo corta la pasta del largo adecuado. Como las pastas tienen ya su forma pero salen blandas conteniendo de 40 a 43% de humedad relativa, deben pasar a las diferentes etapas de secado, éste secado permite reducir la cantidad de agua que tienen las pastas sin deteriorarlas, entonces para poder ser conservadas en buenas condiciones las pastas no deben contener más de un 12,5% de humedad relativa.

Al salir de la prensa las pastas son dirigidas por medio de una correa hacia los secadores; en la primera etapa de presecado en un equipo llamado trabatto, se le extrae el primer porcentaje de humedad por medio de un secado rápido de inversión térmica donde la pasta alcanza la máxima temperatura por un breve tiempo e

inmediatamente después vuelve a perderla lo que la endurece exteriormente. Esto evitará la deformación durante el secado que se realiza mediante cuatro secadores de tambor rotatorio.

La etapa siguiente es la de presecado (primer rotante) donde la pasta debe salir con un 20% de humedad relativa, pasando después a la etapa de secado (segundo y tercer rotante), después a la etapa de estabilización o enfriamiento (cuarto rotante) que representa el punto de equilibrio de todo el sistema, ya que da al producto una humedad del 12,5%, el enfriamiento gradual permite que el producto esté estabilizado y humidificado en la superficie, apto para soportar el salto térmico causado por la gran reducción de temperatura y así luego de enfriada pasar a los silos de almacenamiento temporal para su posterior empaquetado, enfardado y distribución. La figura 1 representa, mediante un diagrama de bloques, el proceso antes descrito.

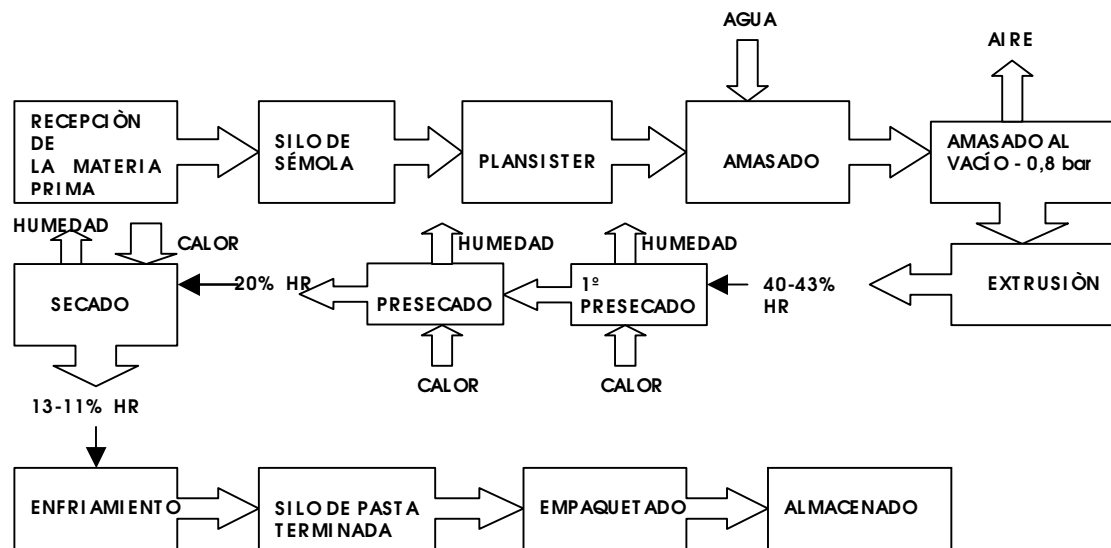


Figura 1. Diagrama de bloques del Proceso

II.2 SECADO DE SÓLIDOS

II.2.1 Secado

El secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido, por evaporación. Los métodos mecánicos para separar un líquido de un sólido no se consideran por lo común como una operación de secado, aunque a menudo proceden a una operación de ésta naturaleza, ya que es menos costoso y muchas veces, más fácil utilizar métodos mecánicos que térmicos⁽⁶⁾.

II.2.2 Aplicación de la psicrometría al secado

En cualquier proceso de secado, suponiendo un suministro adecuado de calor, la temperatura y la velocidad a las cuales se produce la vaporización del líquido dependen de la concentración de vapor en la atmósfera circundante.

En el secado al vacío u otros procesos que implican atmósferas con 100% de vapor, la temperatura de vaporización del líquido será igual o mayor que la temperatura de saturación del mismo, a la presión del sistema⁽⁶⁾. En casi todas las operaciones de secado, el agua es el líquido evaporado; para fines de secado se ha encontrado una carta psicrométrica de gran utilidad, como se ilustra en la figura 2.

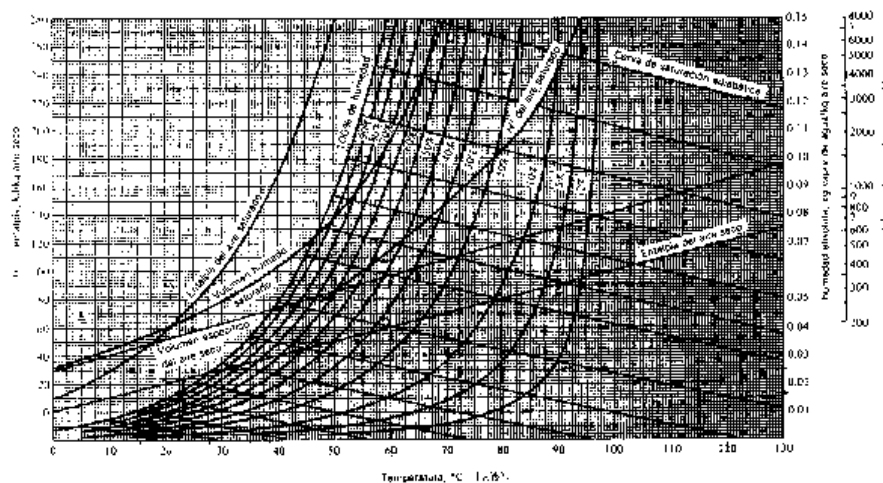


Figura 2. Gráfica Psicrométrica propiedades de las mezclas de aire y vapor de agua de 20 a 120 °C

Donde:

1. *La línea de temperatura de bulbo húmedo o de saturación* da el peso máximo de vapor de agua que puede llevar un kilogramo de aire seco en la intersección con la temperatura de bulbo seco mostrada en la abscisa a la humedad de saturación. La presión parcial del agua en el aire es igual que la presión de vapor a esa temperatura. La humedad de saturación se define por medio de la ecuación:

$$H_s = p_s / (P - p_s) 18 / 28,9 \quad (I)$$

En donde:

H_s = humedad de saturación (kg/kg de aire seco)

p_s = presión de vapor de agua a la temperatura de bulbo seco t_s

P = presión absoluta

18/28,9 = relación de los pesos moleculares del agua (18) respecto al aire (28,9).

Del mismo modo, la humedad en cualquier condición menor que el nivel de saturación se expresa como sigue:

$$H = p / (P - p) 18 / 28,9 \quad (II)$$

2. *El porcentaje de humedad relativa* se define mediante la expresión

$$HR = 100(p/p_s) \quad (III)$$

En donde:

p = presión parcial de vapor de agua en el aire

p_s = presión de vapor de agua a la misma temperatura

HR = porcentaje de humedad relativa.

3. Los volúmenes húmedos se identifican por medio de las curvas que se titulan: “volumen m^3/kg aire seco”. Los volúmenes se representan gráficamente como funciones de humedad y temperatura absolutas. La diferencia entre el volumen específico de aire seco y el volumen de aire húmedo a una temperatura determinada, es el volumen de vapor de agua.

4. Los datos de entalpía se estipulan sobre la base de kilojoules por kilogramo de aire seco. Los datos de entalpía de saturación resultan precisos únicamente cuando se encuentran dentro de la humedad y temperatura de saturación. Las curvas de corrección de entalpía permiten las correcciones de entalpía para humedades debajo de la saturación y muestran cómo las líneas de temperatura de bulbo húmedo no coinciden precisamente con las líneas de enfriamiento adiabático de entalpía constante.

5. Como en la gráfica no aparecen líneas para los calores húmedos, éstos se calculan mediante la expresión:

$$C_S = 1,0 + 1,87 H \quad (IV)$$

En donde:

C_S = calor húmedo de aire húmedo, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

1,0 = calor específico del aire seco, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

1,87 = calor específico del vapor de agua, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

H = humedad absoluta, kg/kg de aire seco.

6. Las líneas de temperaturas de bulbo húmedo representan también las líneas de saturación adiabática para el aire y el vapor de agua. Estas se basan en la relación:

$$H_S - H = (C_S/\lambda)(t - t_s) \quad (V)$$

En donde:

H_s y t_s = humedad y temperatura de saturación adiabática, respectivamente, correspondientes a las condiciones del aire, representadas por H y t .

C_s = calor húmedo a la humedad H . La pendiente de saturación adiabática es

$$C_s/\lambda$$

λ = calor latente de evaporación a t_s .

Estas líneas denotan la relación entre la temperatura y la humedad del aire que pasa por un secador continuo que funciona en forma adiabática.

La temperatura de bulbo húmedo se establece gracias al equilibrio dinámico entre la transmisión de calor y la transferencia de masa, cuando el líquido se evapora de una masa pequeña, por ejemplo, el bulbo húmedo de un termómetro, hacia una masa de gas muy grande, de tal suerte que esta última no sufre ningún cambio de temperatura o humedad. Este se expresa por medio de la relación siguiente:

$$h_c(t - t_w) = k'_g \lambda (H_w - H_a) \quad (VI)$$

En donde:

h_c = coeficiente de transmisión de calor por convección en $J/(m^2 \cdot s \cdot K)$ [Btu/(h)(ft²)(°F)]

t = temperatura del aire en K

t_w = temperatura de bulbo húmedo del aire en K

k'_g = coeficiente de transferencia de masa en $kg/(s \cdot m^2)(kg/kg)$ [lb/(h)(ft²)(lb/lb)]

λ = calor latente de evaporación a t_w en J/kg [Btu/lb]

H_w = humedad saturada a t_w = kg/kg de aire seco y H_a = humedad del aire circundante en kg/kg de aire seco.

Para mezclas de aire y vapor de agua, sucede que $h_c/k'_g = C_s$, aproximadamente, aunque no existe alguna razón teórica para ello. Por tanto, en vista de que la razón $(H_w - H_a)/(t_w - t)$ es igual que $h_c/k'_g/\lambda$, que representa la pendiente de las líneas de

temperatura de bulbo húmedo, también es igual que C_s/λ , la pendiente de las líneas de saturación adiabática, como se indicó antes⁽⁶⁾.

II.2.3 Condiciones generales para el secado

El secado de sólidos incluye dos procesos fundamentales y simultáneos: 1) se transmite calor para evaporar el líquido y 2) se transmite masa en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor desde la superficie. Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la rapidez o el índice de desecación.

Los secadores comerciales difieren fundamentalmente en los métodos de transferencia de calor utilizados. Estas operaciones de secado industrial podrán utilizar transferencia de calor por convección, conducción, radiación o una combinación de éstos. Sin embargo, en cada caso, el calor debe fluir hacia la superficie externa y luego al interior del sólido. La única excepción es el secado dieléctrico y de microondas, en donde la electricidad de alta frecuencia genera calor internamente creando una temperatura elevada dentro del material y en su superficie.

La masa se transfiere durante el secado en forma de líquido o vapor dentro del sólido, y como vapor que se desprende de las superficies expuestas. El movimiento dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración que depende de las características del mismo. Un sólido a secar puede ser poroso o no poroso⁽⁶⁾.

Un estudio de la forma como se seca un sólido se puede basar en el mecanismo interno de flujo del líquido o en las condiciones externas de temperatura humedad flujo de aire, etc., en la velocidad de secado del sólido. El primer procedimiento requiere por lo común un estudio básico de las condiciones internas. Aún cuando el segundo procedimiento es menos fundamental, generalmente es el más utilizado debido a que los resultados tienen una mayor aplicabilidad inmediata en el diseño y la evaluación de equipos.

En cualquier prueba de capacidad para determinar el potencial de un secador de fábrica, es preciso estudiar el efecto de las siguientes variables:

1. *Efecto del aumento de temperatura.* Con frecuencia, esta es la forma más sencilla para lograr una mayor capacidad.

2. *Efecto del aumento de la humedad final.* A causa del aumento notable en el tiempo de secado requerido para secar hasta contenidos de humedad reducidos, la humedad máxima final permisible se debe estipular en todos los casos.
3. *Se debe determinar el efecto del aumento de velocidad del aire.* A menudo se necesitan velocidades de aire superiores para proporcionar el calor adicional necesario a mayores capacidades.
4. *Se debe establecer la uniformidad del flujo de aire.* La distribución eficiente de esta circulación puede reducir de un modo acentuado la capacidad y la eficiencia del secador.
5. *Se deben tomar en cuenta los beneficios posibles de la recirculación del aire.*

II.2.4 Equipo para el secado de sólidos

Hay varias maneras de clasificar los equipos de secado. Las dos clasificaciones más útiles se basan en: 1) el método de transmisión de calor a los sólidos húmedos, o 2) las características de manejo y las propiedades físicas del material mojado. El primer método de clasificación revela las diferencias en el diseño y el funcionamiento del secador, mientras que el segundo es más útil para seleccionar entre un grupo de secadores que se someten a una consideración preliminar en relación con un problema de secado específico.

Podemos clasificar a los secadores como directos o indirectos, estipulando subclases de operación continua o en lotes.

Secadores Directos. Las características generales de operación de los secadores directos son:

1. El contacto directo entre los gases caliente y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor.

2. Las temperaturas de secado varían hasta 1000K, que es la temperatura limitante para casi todos los metales estructurales de uso común. A mayores temperaturas, la radiación se convierte en un mecanismo de transmisión de calor de suma importancia.

3. A temperaturas de gases inferiores al punto de ebullición, el contenido de vapor de un gas influye en la velocidad de secado y el contenido final de humedad del sólido. Con temperaturas de gas superiores al punto de ebullición en todos los puntos, el contenido de vapor del gas tiene sólo un ligero efecto de retraso en la velocidad de secado y el contenido final de humedad. Por lo tanto, los vapores supercalentados del líquido que se está separando pueden servir para secar.

4. Para secado a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, quizá sea necesario deshumidificar el aire de secado.

5. Un secador directo consume más combustible por libra de agua evaporada cuanto más bajo sea el contenido de humedad.

6. La eficiencia mejora al aumentarse la temperatura del gas de entrada, para una temperatura de salida constante.

7. Debido a las grandes cantidades de gas que se necesitan para abastecer todo el calor desecado, el equipo de recuperación del polvo puede ser muy grande y costoso cuando se trata de secar partículas muy pequeñas.

Secadores Indirectos. Difieren de los directos en la transmisión de calor y la separación del vapor:

1. El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre de índole metálica.

2. Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación en el caso de secadores de congelación hasta mayores que 800 K en el caso de secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión.

3. Los secadores indirectos son apropiados para secar a presiones reducidas y en atmósferas inertes, para poder recuperar los disolventes y evitar la formación de mezclas explosivas o la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.

4. Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son en general económicos, desde el punto de vista de consumo de calor, ya que suministran calor sólo de acuerdo con la demanda hecha por el material que se está secando.

5. La recuperación de polvos y materiales finamente pulverizados se maneja de un modo más satisfactorio en los secadores indirectos que en los directos.

Secadores rotatorios

Un secador rotatorio consiste en un cilindro que gira sobre cojinetes apropiados y, por lo común, tiene una leve inclinación en relación con la horizontal. La longitud del cilindro va de 4 a más de 10 veces su diámetro, que oscila entre menos de 0,3 hasta más de 3 m. Los sólidos que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él, debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro, y se descargan por el otro extremo como producto acabado. Los gases que circulan por el cilindro pueden reducir o aumentar la velocidad de movimiento de los sólidos, según que la circulación del gas sea a contracorriente o siga una corriente paralela con la circulación de los sólidos⁽⁶⁾.

Los secadores rotatorios se clasifican como directos, indirectos-directos, indirectos y tipos especiales, un ejemplo de ellos podemos observarlo en la figura 3. Estos nombres se refieren al método de transmisión de calor, que es directo cuando el calor se aplica o elimina de los sólidos por intercambio directo entre éstos y el gas circulante, e indirecto cuando el medio de calentamiento no tiene un contacto físico con los sólidos y se separa de ellos por medio de un tubo o una pared metálica.

Cuando se trata de operaciones de transmisión de calor y transferencia de masa, sus características de operación los hacen adecuados para lograr diversos procesos como secado, reacciones químicas, recuperación de disolventes, descomposiciones térmicas, mezclado, sintetización y aglomeración de sólidos.

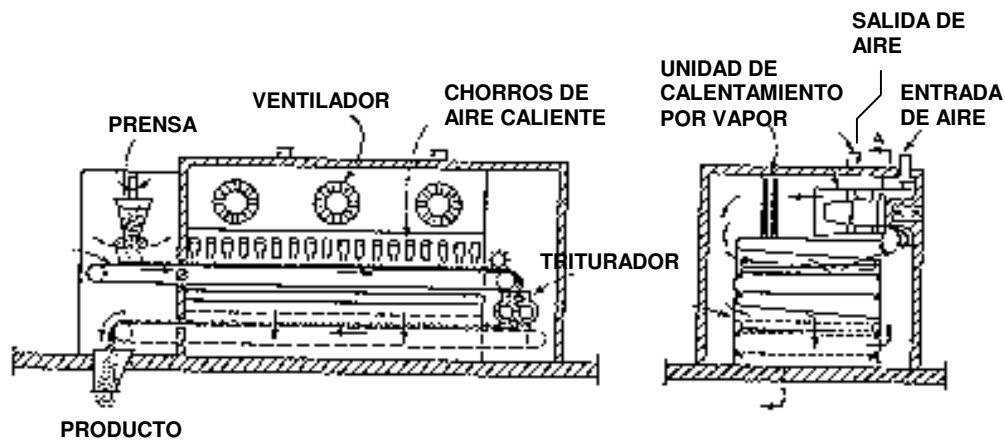


Figura 3. Ejemplo de Secador Rotatorio

II.3 AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS

La automatización se basó inicialmente en lógicas mecánicas, luego en electromagnéticas (como relés timers a motor sincrónico y contadores electromecánicos) e incluso se presentaron comercialmente lógicas neumáticas (AND, OR, NOT) que competían en velocidad con los relés. Paulatinamente se impusieron los relés, luego los timers, los contactores y los programadores electrónicos, pero hoy en día se utilizan microcontroladores lógicos programables⁽¹¹⁾.

La automatización de un proceso industrial consiste en la incorporación de un dispositivo electrónico que se encarga de controlar el funcionamiento del proceso basándose en una serie de elementos definidos previamente. El sistema que se crea con la incorporación del dispositivo denominado genéricamente automatismo, es capaz de reaccionar ante las situaciones que se presentan ejerciendo el control ejerciendo el control para el que ha sido concebido⁽¹¹⁾.

En la figura 4 se observa un esquema de bloques que representa a un sistema automático, en este sistema existe una unidad de control encargada de realizar todas

las operaciones relacionadas con el proceso que debe hacerse en forma automática dicha unidad recibe las informaciones precedentes de sensores que informan cambios físicos que tienen lugar como consecuencia de la función para la que se diseñó el sistema automático. En función de la información recibida la unidad de control genera una serie de órdenes que se transmiten al equipo a través de accionadores que transforman las órdenes recibidas en magnitudes o cambios físicos del sistema.

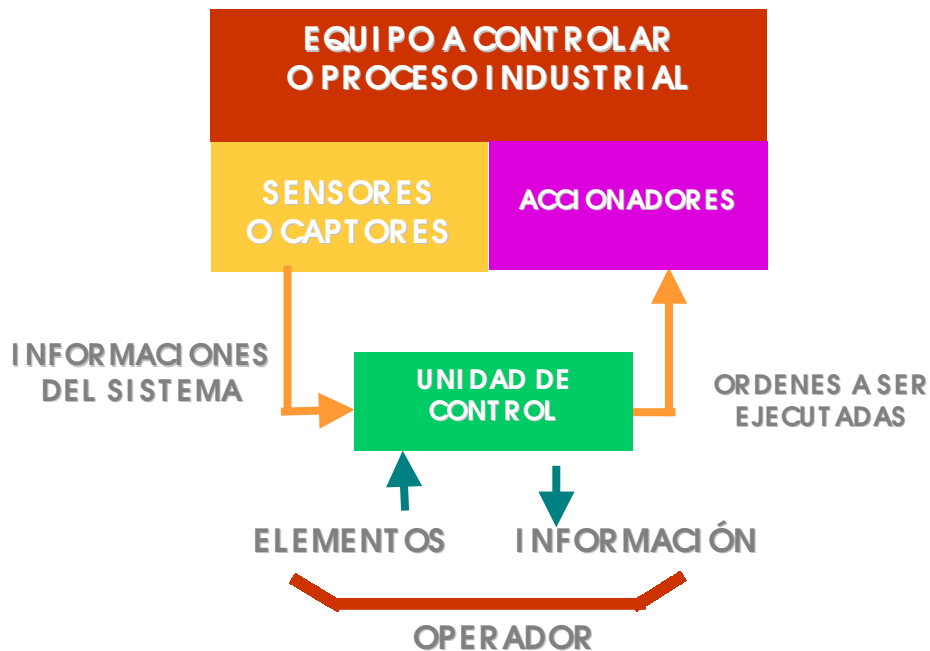


Figura 4. Esquema representativo de un sistema automático

Esto quiere decir que la automatización consiste en un sistema de lazo cerrado, en el que existe un continuo flujo de información, desde el proceso a la unidad de control y viceversa. La información recibida en la unidad de control se procesa según el programa que contenga el sistema (denominado algoritmo) del que se obtienen las órdenes que fijarán el funcionamiento del proceso⁽¹¹⁾.

La unidad de control es capaz de proporcionar al operador, información ya elaborada sobre el estado y evolución del proceso mediante un sistema de monitoreo. Por otra parte el operador puede intervenir en el desarrollo del control mediante las consignas que modifican los parámetros del algoritmo de control, o puede tomar el

mando total pasando el sistema a control manual, con lo cual dejará de operar automáticamente (esto significa que el sistema automático también puede operar en forma manual).

El automatismo se define como el dispositivo eléctrico, electrónico, hidráulico, neumático, etc., que se coloca a un equipo para que funcione de manera automática, es decir lograr la automatización del mismo. Dichos procesos se hacen actualmente mediante la utilización de PLC's, cuyas siglas en inglés significan Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable). Dicho equipo es un elemento electrónico creado para el control de procesos secuenciales y su lenguaje abarca posibilidades tales como contactos en serie y en paralelo, contadores, temporizadores y funciones mucho más complejas.

II.4 DEFINICIÓN DE CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (PLC)

Se entiende por Controlador Lógico Programable (PLC) a toda máquina electrónica diseñada para controlar en tiempo real y en medios industriales procesos secuenciales⁽¹⁰⁾.

Un PLC suele emplearse en procesos industriales que tengan necesidades particulares, por eso son ampliamente utilizados en el control de maniobras de máquinas, maniobra de instalaciones y en instalaciones de señalización y control.



Figura 5. Ejemplo de un PLC

II.4.1 Funciones básicas de un PLC

Detección. Lectura de la señal de los captadores distribuidos por el sistema de fabricación.

Mando. Elaborar y enviar las acciones al sistema mediante los accionadores y preaccionadores.

Dialogo hombre-máquina. Mantener un diálogo con los operarios de producción, obedeciendo sus consignas e informando del estado del proceso.

Programación. Para introducir, elaborar y cambiar el programa de aplicación del autómat. El dialogo de programación debe permitir modificar el programa incluso con el autómat controlando la maquina.

II.4.2 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⁽¹⁰⁾.

Su utilización se da fundamentalmente en aquellas instalaciones en donde es necesario un proceso de maniobra, control, señalización, etc. , por tanto, su aplicación abarca desde procesos de fabricación industriales de cualquier tipo a transformaciones industriales, control de instalaciones, etc.

Sus reducidas dimensiones, la extremada facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenar los programas para su posterior y rápida utilización, la modificación o alteración de los mismos, etc., 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.
- } Maquinaria de procesos variables.
- } Instalaciones de procesos complejos y amplios.

✓ Chequeo de programación centralizada de las partes del proceso.

Su sistema modular de entradas/salidas (E/S), permite que se pueda conectar con facilidad a dispositivos en el control de un proceso industrial. La forma más simple de este tipo de dispositivos son las entradas y salidas discretas o digitales representando condiciones de encendido o apagado de un circuito eléctrico.

II.4.3 ¿Por qué emplear el PLC en control de procesos?

Entre las ventajas de los controladores lógicos programables es la independencia a las intervenciones frecuentes por parte de los operadores, la reprogramación remota y las capacidades de exhibición visual. Debido a que los controladores programables han sido producidos para el control de maquinaria, éstos se pueden programar en línea y su sistema operativo en lenguaje de escalera los hace que sean apropiados para el control de los pasos secuenciales típicos de muchos procesos. Los controladores más recientes pueden llevar a cabo la regulación de lazos de control mediante algoritmos del tipo PID (proporcional integral derivativo) y su capacidad de interconexión en redes de equipo ya establecidas con el mínimo de modificaciones en la configuración de éstas⁽⁹⁾.

Los controladores programables permiten hacer control en tiempo real sobre operaciones típicas del control de procesos, tales como el mezclado, calentamiento, bombeo y el acomodo y ordenamiento de productos que avanzan sobre bandas transportadoras, etc⁽¹²⁾.

Otro uso de los controladores programables es la colección de datos referentes a la planta y al proceso, tales como atributos de las materias primas, en procesos y productos terminados para los inventarios. Los datos pueden incluir valores de calidad del producto producido, temperatura del producto, presión, localización, tiempos en proceso, porcentaje completado y muchas otras cantidades que se pueden sensor. Adicionalmente, los controladores programables pueden reportar sobre la disposición de las facilidades, acumular datos sobre los tiempos de operación de los equipos, ciclos de conteo y monitoreo de la potencia para proporcionar un

diagnóstico para mantenimiento preventivo, seguridad y paros de emergencia y manejos de sistemas de quemadores.

Los sistemas basados en controladores programables son rentables para el control tanto de sistemas pequeños como grandes debido a que son modulares, escalables y flexibles.

Modularidad. Proporciona un crecimiento del sistema de control del proceso a un costo moderado con una variedad de opciones y fácil integración tanto de hardware como software, prestándose a sí mismo para optimizar al máximo el costo. La flexibilidad en el software para el manejo y administración del proceso y el diseño del control mediante dispositivos configurables permite la rápida integración de sensores en el proceso y el sensado más sencillo de alarmas en el sistema de control. Las opciones más recientes de software toman las ventajas de esta modularidad para simplificar grandemente la configuración y operación del sistema de control de procesos.

Escalabilidad. La escalabilidad significa que el sistema de control puede fácilmente crecer, ya sea hacia arriba o hacia abajo, para satisfacer los cambios en la producción y/o los requerimientos presupuestales. En grandes sistemas de control de propósito muy específico, es difícil una vez instalado y en operación hacer modificaciones. Con un sistema basado en controladores lógicos programables, el ingeniero en control tiene muchas opciones para elegir en el desarrollo de una arquitectura de control sobre todo cuando se tienen limitaciones y restricciones presupuestales. Un sistema basado en el PLC puede también decrecer con cierta facilidad, lo cual de ningún modo quiere decir que el equipo no utilizado o retirado se deba desechar.

Flexibilidad. La flexibilidad del sistema quiere decir que el equipo se puede adaptar a propósito múltiples y a las necesidades cambiantes del control del proceso. A medida que las nuevas tecnologías se desarrollan, se pueden integrar con facilidad en un sistema flexible con el mínimo costo y en un corto lapso de tiempo para su implementación. Se pueden lograr incrementos en la capacidad de producción y mejoras al proceso mediante la adopción de opciones de software avanzado (tales como la capacidad de generación continua de reportes),

consolas de control adicionales, o añadiendo módulos de E/S de amplio rango para incrementar los dispositivos de campo empleados en un proceso en línea.

II.4.4 Constitución básica de un PLC

Los componentes de un PLC básico son los siguientes:

- ┌ Rack principal
- ┌ Fuente de alimentación
- ┌ CPU
- ┌ Tarjetas entradas/salidas digitales
- ┌ Tarjetas entradas/salidas analógicas
- ┌ Tarjetas especiales
- ┌ Interfaces
- ┌ Unidades de Programación

En la figura 6 se observa el diagrama que representa al PLC con su entorno, lo que configura el sistema automático completo

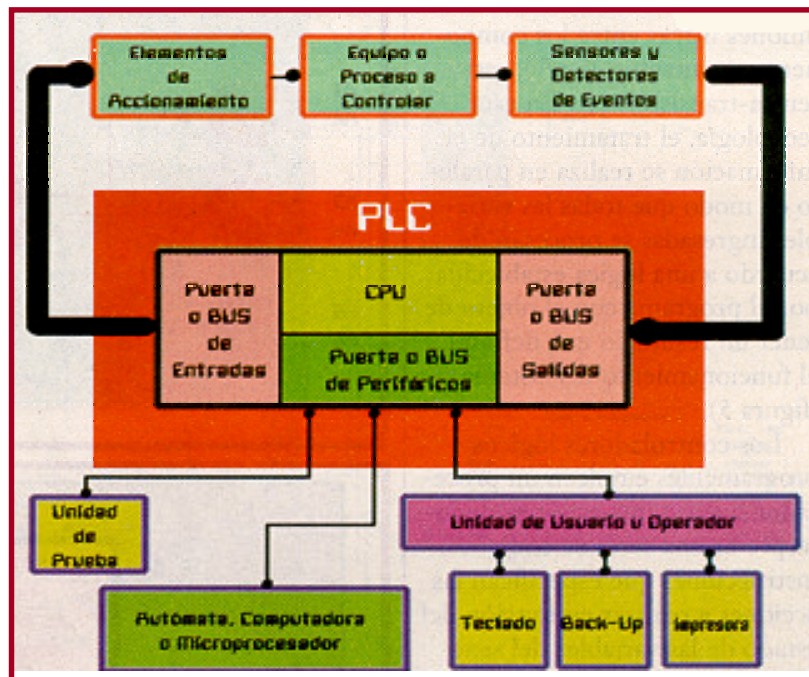


Figura 6. Sistema automático

Rack principal

Este elemento es sobre el que se conectan el resto de los elementos como podemos ver en la figura 7. Este va atornillado a la placa de montaje del armario de control. Puede alojar a un número finito de elementos dependiendo del fabricante y conectarse a otros racks similares mediante un cable al efecto, llamándose en este caso rack de expansión⁽¹⁰⁾.

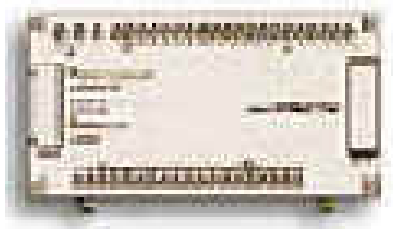


Figura 7. Modelo de Rack

Fuente de alimentación

Es la encargada de suministrar la tensión y corriente necesarias tanto a la CPU como a las tarjetas (según fabricante), como se muestra en la figura 8. La tensión de entrada es normalmente de 110/220VAC de entrada y 24 DCV de salida que es con la que se alimenta a la CPU.



Figura 8. Fuente de alimentación

Unidad de Procesamiento Central (CPU)

Es el cerebro del PLC, aquí es donde se conecta el PC al autómata. Consta de uno o varios microprocesadores (según fabricante) que se programan mediante un software propio. La mayoría de ellos ofrecen varias formas de programación

(lenguaje contactos, lenguaje nemónico o instrucciones, lenguaje de funciones, grafcet, etc)⁽¹⁰⁾.

El programa alojado en la CPU va escrito en un lenguaje propio de la misma, se ejecuta en una secuencia programable y tiene un principio y un final, el tiempo que transcurre entre los dos se llama ciclo de scan y hay un temporizador interno que vigila que este programa se ejecute de principio a fin y que el tiempo de ejecución del programa de usuario no exceda un tiempo máximo determinado siendo esta función denominada "perro guardián" o "watchdog". Si este temporizador finaliza y el programa no ha ejecutado la instrucción END, el PLC pasará a estado de STOP.⁽¹⁰⁾

Otra función es la de renovar el estado de las salidas en función de la imagen de las mismas obtenida al final del ciclo de ejecución del programa de usuario. Por último también se encarga de realizar el chequeo del sistema; para ello el PLC posee un ciclo de trabajo, que ejecutará de forma continua el diagrama de flujo mostrado en la figura 9. ⁽¹⁰⁾

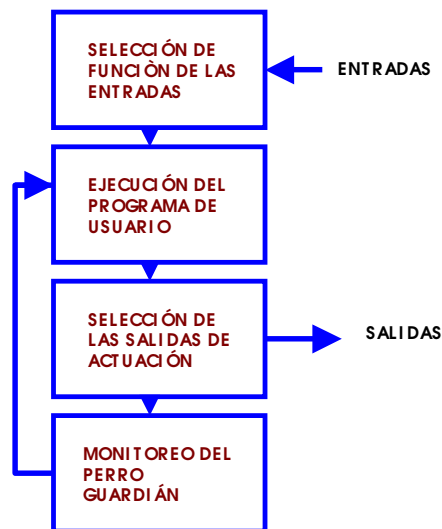


Figura 9. Ciclo de trabajo de un PLC

Podemos decir entonces que el CPU se encarga de:

- | Interpretar las instrucciones del programa del sistema.
- | Revisar y actualizar los estados de las señales de entrada y salida.
- | Vigilar y diagnosticar el funcionamiento del sistema.

- Comunicarse con el exterior a través de periféricos.

En la figura 10 se ilustra una configuración de una CPU, en este caso en rack, que incorpora la fuente de alimentación del sistema. Se trata de una configuración con procesador y memoria en un solo módulo, que además incorpora circuitos de interconexión a E/S que pueden montarse en el mismo rack⁽¹²⁾.

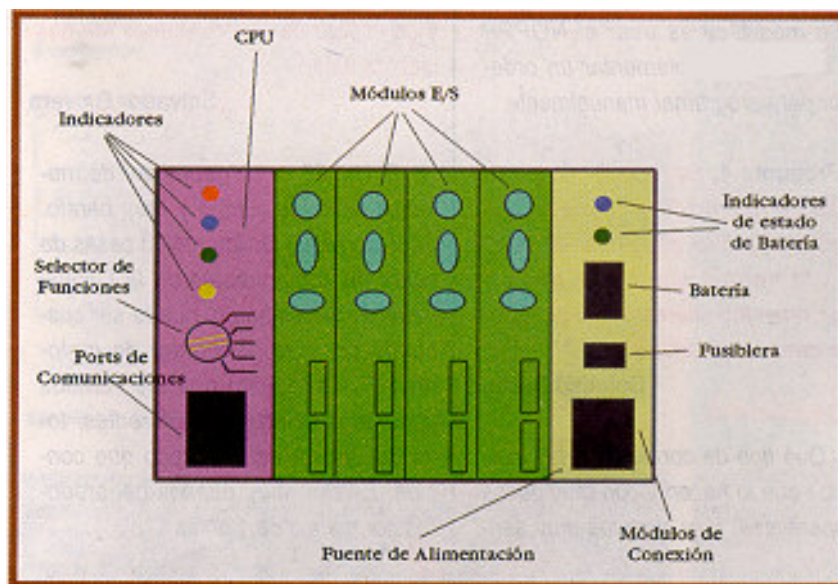


Figura 10. Configuración de una CPU

Sistema de Entrada/Salida del PLC

La información que se recoge del entorno recibe el nombre genérico de Entrada y llega al PLC por medio del sistema de ENTRADAS, mientras que las acciones de control sobre el proceso se denominan Salida y se acciona mediante las SALIDAS⁽¹³⁾. Los dispositivos de entrada corresponden a un amplio conjunto de elementos como, interruptores, pulsadores, pirómetros, detectores de humo, sensores, etc., mientras que los dispositivos de salida se encargan de energizar a los dispositivos constituyentes del sistema de control y corresponden a relés, triacs, electroválvulas, etc. En la figura

11 se puede observar un modelo de PLC comercial en los que se aprecia el rack de entrada/salida⁽¹³⁾.

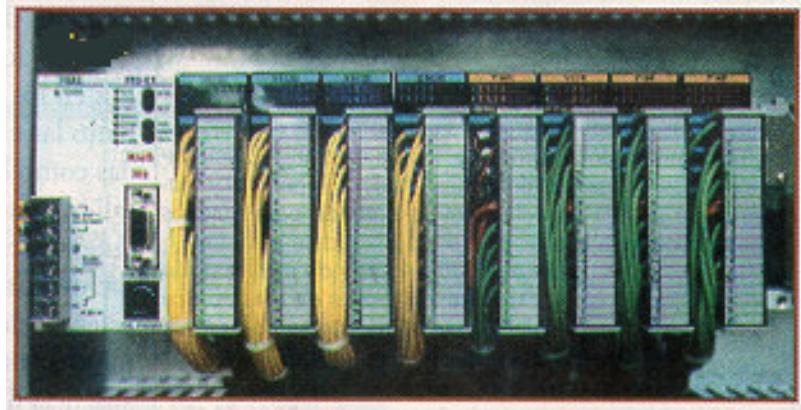


Figura 11. Módulos de entrada/salida en un PLC⁽¹³⁾

Módulo de salidas

El módulo de salidas del autómata es el encargado de activar y desactivar los actuadores (bobinas de contactores, lámparas, motores, etc).

La información enviada por las entradas a la CPU, una vez procesada, se envía al módulo de salidas para que estas sean activadas y a la vez los actuadores que en ellas están conectados.

Según el tipo de proceso a controlar por el autómata, podemos utilizar diferentes módulos de salidas. Existen tres tipos bien diferenciados: a relés, a triac y a transistores

Módulos de salidas a relés. Son usados en circuitos de corriente continua y alterna, están basados en la conmutación mecánica por la bobina del relé de un contacto directo normalmente abierto.

Módulos de salidas a triacs. Se utilizan en circuitos de corriente continua y corriente alterna que necesiten maniobras de comunicación muy rápidas.

Módulos de salidas a Transistores a colector abierto. El uso de este tipo de módulos es exclusivo de los circuitos de c.c. Igualmente que en los de triacs, es utilizado en circuitos que necesiten maniobras de conexión/desconexión muy rápidas.

Tarjetas entradas/salidas digitales

Se conectan al rack y comunican con la CPU a través de la citada conexión. En el caso de las entradas digitales transmiten los estados 0 o 1 del proceso (preestatos, finales carrera, detectores, conmutadores, etc) a la CPU. En el caso de las salidas, la CPU determina el estado de las mismas tras la ejecución del programa y las activa o desactiva en consecuencia. Una entrada digital al sistema de control permite al controlador leer el estado de un circuito para saber si está o no energizado. A su vez las salidas digitales permiten encender o apagar circuitos eléctricos. De esta manera el controlador programable puede examinar el estado de varias entradas del proceso, aplicar un conjunto de reglas lógicas (programa) y entonces encender o apagar un circuito eléctrico del mundo real con base en estas reglas lógicas⁽¹³⁾.

La señal de entrada de un PLC puede ser la que suministra un interruptor On-Off o diferentes niveles de tensión suministrados, por ejemplo por un sensor de temperatura. Lo mismo ocurre con las salidas, es decir, una señal procedente del PLC puede ser simplemente un estado “1” ó “0”, pero también puede tratarse de un conjunto de bits que representan una palabra de información. Los sistemas discretos de E/S son aquellos en los que, tanto las entradas como las salidas, pueden tener únicamente dos niveles, es decir, presencia o ausencia de un nivel de tensión.⁽¹³⁾

Tarjetas entradas/salidas analógicas

Se conectan al rack de igual manera que las anteriores, pero teniendo en cuenta que en algunos modelos de PLC' s han de estar situadas lo mas cerca posible de la CPU. Estas tarjetas leen un valor analógico e internamente lo convierten en un valor digital para su procesamiento en la CPU. Esta conversión la realizan los

convertidores analógico-digitales internos de las tarjetas que en algunos casos es uno para todos los canales de entrada o salida aunque actualmente se tiene uno por cada canal de entrada o salida. En este último caso el procesamiento de las señales analógicas es mucho más rápido que en el otro.

Estas tarjetas son normalmente de 2, 4, 8 o 16 entradas/salidas analógicas, llamándose a cada una de ellas canal y empezando por el 0, esto es, una tarjeta de 4 canales analógicos comenzaría por el 0 y terminaría en el 3. Los rangos de entrada están normalizados siendo lo más frecuente el rango de 4-20 mA (miliamperios) y 0-10 DCV, aunque también existen de 0-20 mA, 1-5V, 0-5V, etc⁽¹³⁾.

Lo más importante a la hora de elegir una tarjeta analógica es que esta disponga de separación galvánica para cada canal, es decir, que los canales sean totalmente independientes electrónicamente unos de otros dentro de la propia tarjeta para que no se afecten mutuamente por efecto de una mala tierra o derivación a la misma de uno de ellos.

Tarjetas especiales

Se conectan al rack y comunican con la CPU a través de la citada conexión. Se utilizan normalmente para control o monitorización de variables o movimientos críticos en el tiempo, ya que usualmente realizan esta labor independientemente de la CPU. Son algunas muestras las siguientes:

Tarjetas de conteo rápido

Tarjetas de posicionamiento de motores

Tarjetas de regulación.⁽¹⁰⁾

Periféricos

Los periféricos no intervienen directamente en el funcionamiento del autómatas, pero sin embargo facilitan la labor del operario.

Los más utilizados son:

- Impresoras.
- Visualizadores y paneles de operación OP.

II.5 SISTEMA SCADA-MMI

Un sistema MMI (Man Machine Interface) es el interfaz de unión entre el operario y la máquina. Puede ser un panel de operador ó una computadora (PC), pero en ambos casos comunican y transmiten datos a y desde el PLC⁽³⁾.

Las funciones básicas de éste son las siguientes:

- Transferencia y modificación de programas.
- Verificación de la programación.
- Información del funcionamiento de los procesos.

En el caso de un Panel de Operador, este se compone de una pantalla con más o menos resolución de gráficos y teclas numéricas y de función o como en algunos casos pantalla táctil, ver figura 12. La pantalla puede ser en color o monocromo e indica el estado de los diferentes valores del proceso, con gráficos complejos o figuras sencillas permitiendo a su vez introducir valores para ajustar los parámetros de regulación del proceso o consignas del mismo⁽³⁾.

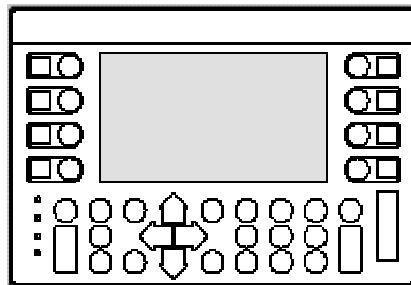


Figura 12. Ejemplo de panel de operación

Se programan con un software propio, al igual que los PLC' s, y diferente a estos aunque sean del mismo fabricante. Comunican con el PLC a través de un puerto de comunicación. Generalmente el frontal suele ser de un material plástico o similar con un alto grado de protección, ya que está expuesto a la intemperie o al ambiente agresivo del lugar de trabajo.

También se puede utilizar como panel operador una consola de programación. Es una terminal a modo de ordenador que proporciona una forma más cómoda de

realizar el programa de usuario y observar parámetros internos del PLC, ver figura 13.

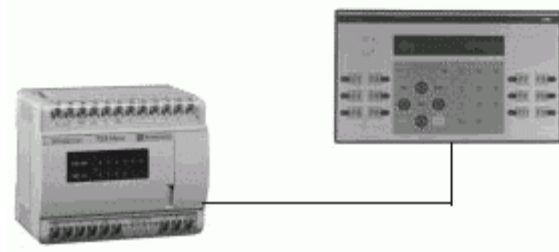


Figura 13. Comunicación entre una consola de programación y un autómata

Entre las funciones que pueden desarrollar estos paneles de operador están las siguientes:

- | Visualizar y parametrizar datos del proceso (lectura y escritura de variables)
- | Gestión de alarmas del proceso, con textos de ayuda al operario para la resolución de las mismas
- | Recopilación de alarmas sucedidas en el tiempo (histórico de alarmas)
- | Impresión de las citadas alarmas

En el caso de una computadora (PC), esta es la encargada de comunicar con el PLC, ver figura 14. Realiza las mismas funciones que un panel de operador y además puede trabajar como sistema SCADA (adquisición de datos) y con los nuevos controles disponibles e integrados en los sistemas operativos (Windows 95/98/NT) se puede hacer por ejemplo que ante una alarma del sistema el PC marque un número telefónico o mande un mensaje a un móvil con un texto asociado al operario o personal de mantenimiento correspondiente⁽³⁾.

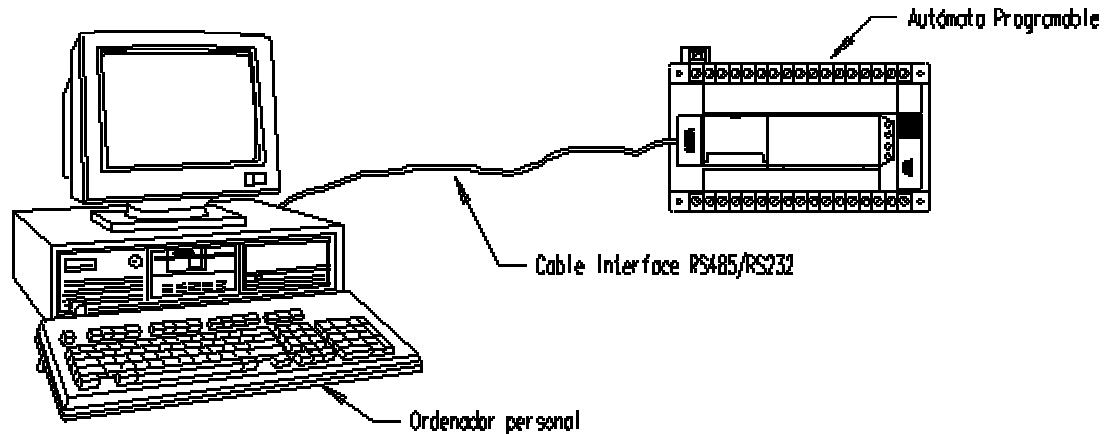


Figura 14. Comunicación entre el PC y el autómata (PLC)

II.6 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN

Cuando surgieron los autómatas programables, lo hicieron con la necesidad de sustituir a los enormes cuadros de maniobra contruidos con contactores y relés. Por lo tanto, la comunicación hombre-maquina debería ser similar a la utilizada hasta ese momento. El lenguaje usado, debería ser interpretado, con facilidad, por los mismos técnicos electricistas que anteriormente estaban en contacto con la instalación. Estos lenguajes han evolucionado en los últimos tiempos, de tal forma que algunos de ellos ya no tienen nada que ver con el típico plano eléctrico a relés.

Los lenguajes más significativos son:

Lenguaje a contactos (LD). Es el que más similitudes tiene con el utilizado por un electricista al elaborar cuadros de automatismos. Muchos autómatas incluyen módulos especiales de software para poder programar gráficamente de esta forma, la que podemos apreciar en la figura 15.

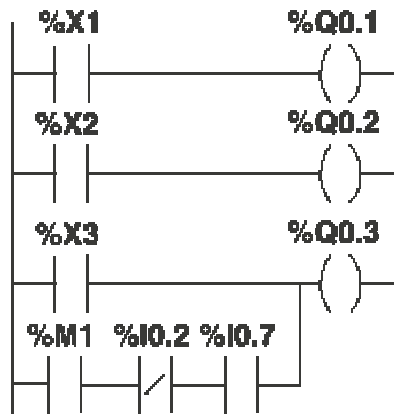


Figura 15. Programación en lenguaje a contactos (LD)

Lenguaje por Lista de Instrucciones (IL). En los autómatas de gama baja, es el único modo de programación. Consiste en elaborar una lista de instrucciones o nemónicos que se asocian a los símbolos y su combinación en un circuito eléctrico a contactos, como podemos ver en la figura 16. También decir, que este tipo de lenguaje es, en algunos los casos, la forma más rápida de programación e incluso la más potente.

000	LD	%I0.1	Bp. inicio ciclo
	AND	%I0.0	Dp. presencia vehículo
	AND	%M3	Bit autorización reloj calendario
	AND	%I0.5	Fc. alto rodillo
	AND	%I0.4	Fc. detrás pórtico
005	S	%M0	Memo inicio ciclo
	LD	%M2	
	AND	%I0.5	
	OR	%I0.2	Bp. parada ciclo
	R	%M0	
010	LD	%M0	
	ST	%Q0.0	Piloto ciclo

Figura 16. Programación en un lenguaje por lista de instrucciones

Grafcet (SFC). Es el llamado Gráfico de Orden Etapa Transición. Ha sido especialmente diseñado para resolver problemas de automatismos secuenciales. Las acciones son asociadas a las etapas y las condiciones a cumplir a las transiciones. Este lenguaje resulta enormemente sencillo de interpretar por operarios sin conocimientos

de automatismos eléctricos. Muchos de los autómatas que existen en el mercado permiten la programación en GRAFCET, ver figura 17. También podemos utilizarlo para resolver problemas de automatización de forma teórica y posteriormente convertirlo a plano de contactos.

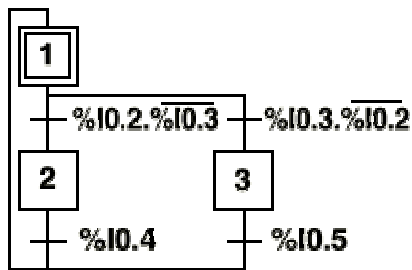


Figura 17. Programación en Grafcet

Plano de Funciones (FBD). El plano de funciones lógicas, resulta especialmente cómodo de utilizar, para técnicos habituados a trabajar con circuitos de puertas lógicas, ver figura 18, ya que la simbología usada en ambos es equivalente⁽³⁾.

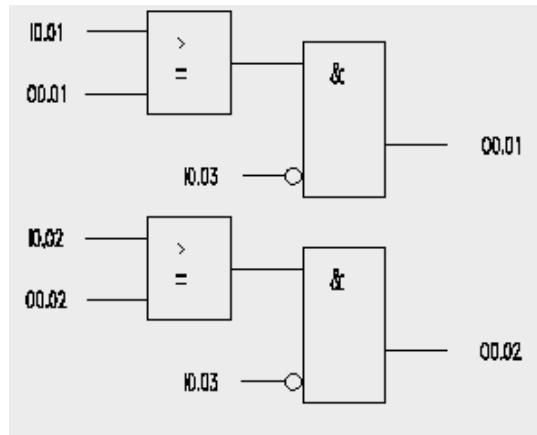


Figura 18. Plano de funciones lógicas

II.7 TEORÍA BÁSICA DEL CONTROL DE PROCESOS

II.7.1 VÁLVULAS DE CONTROL

El elemento más deseado en los procesos industriales para modificar la resistencia al flujo son las válvulas de control. La posición de la válvula esta relacionada con el suministro de aire, ya que si el mismo falla la válvula se abre o se cierra según el tipo de actuador (ATO ó ATC). Cuando la válvula es ATO la válvula falla cerrada y cuando es ATC falla abierta.

II.7.2 CONTROLADORES POR RETROALIMENTACIÓN O FEEDBACK

Durante el proceso cualquier perturbación puede afectar a la variable controlada, es decir, cuando ésta se desvía del punto de control, el controlador cambia su salida para que la variable regrese al punto de control y compensar cualquier perturbación.

La manera en que los controladores por retroalimentación toman una decisión para mantener el punto de control, es mediante el cálculo de la salida con base en la diferencia entre la variable que se controla y el punto de control⁽¹⁾.

Controlador Proporcional (P)

Estos son los controladores más simples ya que sólo tienen un parámetro de ajuste, K_c denominada Ganancia del Controlador, pero la desventaja es que operan con una desviación, o error de estado estacionario, en la variable que se controla.

Controlador proporcional-integral (PI)

En algunos procesos no se pueden controlar con una desviación, es decir, se deben controlar en el punto de control, por ello se debe añadir otro parámetro al controlador proporcional que es la acción integral o de reajuste para eliminar la desviación; entonces el controlador se convierte en un controlador proporcional-integral (PI)

Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)

Cuando al controlador PI se le añade otro modo de control que es la acción derivativa, también se conoce como rapidez de derivación o preactuación y tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, por ello se denomina controlador PID. Estos se recomiendan para circuitos con constante de tiempo larga en los que no hay ruido. La ventaja del modo derivativo es que proporciona la capacidad de ver hacia donde se dirige el proceso.

II.8 AJUSTE DE LOS CONTROLADORES FEEDBACK

El ajuste es el procedimiento mediante el cual se adecuan los parámetros del control feedback para obtener una respuesta específica a lazo cerrado. La principal dificultad en el ajuste del controlador feedback radica en la velocidad de respuesta del proceso a controlar. Para ajustar los controladores a varios criterios de respuesta se han desarrollado diversos procedimientos y fórmulas de ajuste⁽¹⁾.

Las características dinámicas de los otros elementos del lazo de control, particularmente del proceso y los valores de los parámetros de ajuste son función de la respuesta del lazo cerrado que se desea. La mayoría de los procesos son no lineales lo cual quiere decir que su personalidad cambia de un punto de operación a otro. Esto significa que un conjunto de parámetros de ajuste produce una respuesta deseada únicamente en el punto de operación a partir del cual se calcularon.

Criterios de ajuste

Hay un número de criterios mediante los cuales se especifica el desempeño deseado para un lazo de control. Estas especificaciones de control deben ser físicamente realizables: no se puede violar ninguna restricción de variable manipulada y no se puede requerir un elemento de control irrealizable. Las especificaciones dinámicas de control incluyen las siguientes:

- Sobrepico (Overshoot): obtener el mínimo sobrepico o ningún sobrepico (respuesta sobre amortiguada).
- Tiempo de elevación (Rise Time): obtener el menor tiempo de elevación (respuesta más rápida).
- Razón de asentamiento (Decay ratio): lograr una relación de asentamiento específica (la mas popular en $1/4$)
- Tiempo de asentamiento (Setting time): alcanzar tiempos de asentamiento cortos.
- Integral de error: minimizar la integral de los errores hasta que el proceso se haya asentado.
- Error en el estado estacionario (FOCET): mantenerlo tan pequeño como sea posible⁽⁸⁾.

II.8.1 METODOS DE AJUSTE

Método de 1^{er} orden más tiempo muerto

Este otro método de Ziegler-Nichols de ajuste lineal caracteriza al proceso mediante la ganancia y período últimos.

El proceso caracterizado incluye el comportamiento de la válvula de control y del sensor/transmisor. Los parámetros característicos de este modelo son: la ganancia K, el tiempo muerto D y la constante de tiempo τ .

La solución consiste en realizar algunas pruebas dinámicas en el sistema real o en una simulación del lazo en la computadora. La prueba más simple es la de escalón⁽¹⁾.

Prueba de escalón del proceso

1. Con el controlador en manual se aplica un cambio en escalón a la señal de salida del controlador $m(t)$. El cambio debe ser lo suficientemente grande para que se pueda medir un cambio en el transmisor, pero no tanto como para que las no lineales del proceso distorsionen la respuesta.

2. Se registra $C(t)$ en el período completo de la prueba, desde la introducción del escalón hasta el nuevo estado estacionario⁽⁸⁾.

Es imperativo que no entren perturbaciones al sistema mientras se realiza la prueba. La gráfica que se obtiene se conoce como curva de reacción del proceso. El siguiente paso es hacer coincidir la curva de reacción con el modelo POMTM para determinar los parámetros del modelo. La figura 19 muestra una curva de reacción típica de la prueba⁽⁸⁾.

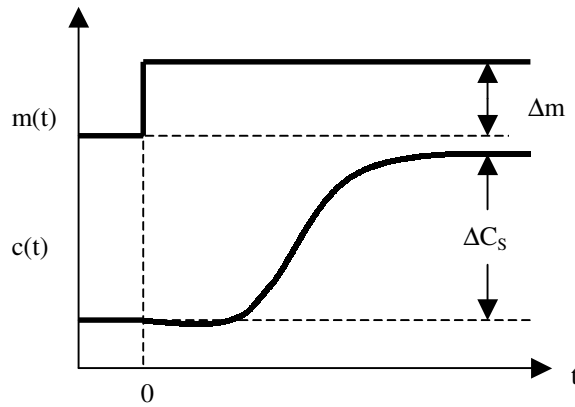


Figura 19. Curva de Reacción de un Proceso⁽¹⁾

La ganancia K , se calcula a partir de los cambios totales de $c(t)$ y $m(t)$ en el estado estacionario como:

$$K = \frac{\Delta C_s}{\Delta m}$$

El tiempo muerto D y la constante de tiempo τ , se pueden determinar de manera que la respuesta del modelo y la real coincidan en la región de alta tasa de cambio. Los dos puntos recomendados por el Dr. Cecil Smith son: $(D + 1/3\tau)$ y $(D + \tau)$ los cuales corresponden a los siguientes valores de C_s :

Para	$t = D + \tau$	$\Delta c(t) = 0.632 \tau C_{ee}$
Para	$t = D + 1/3\tau$	$\Delta c(t) = 0.283 \tau C_{ee}$

En la figura 19 estos dos puntos se denominan t_1 y t_2 y los valores de D y τ se obtienen a partir de la resolución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$D + \tau = t_2 \quad \text{y} \quad D + 1/3\tau = t_1$$

Lo cual se reduce a:

$$\tau = 3/2(t_2 - t_1) \quad \text{y} \quad D = t_2 - \tau$$

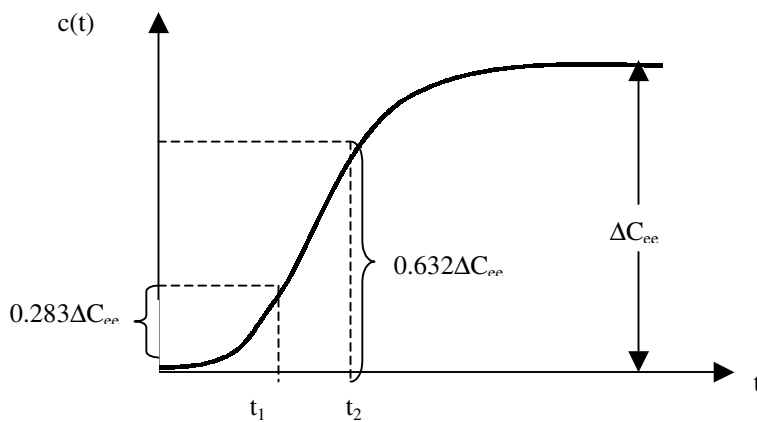


Tabla 1. Fórmulas de ajuste POMTM de Ziegler – Nichols.⁽¹⁾

Figura 20. Parámetros del modelo POMTM

Asentamiento de $1/4$ y Error de Integración Mínimo

Ziegler y Nichols proponen un conjunto de fórmulas basadas en los parámetros del modelo POMTM. La tabla siguiente muestra las fórmulas de ajuste para respuesta de razón de asentamiento de $1/4$ ⁽¹⁾.

La especificación de la respuesta a lazo cerrado es un error o desviación mínima

Tipo de Controlador	Ganancia Proporcional (K _c)	Tiempo Integral (â)	Tiempo Derivativo (â _d)
Proporcional (P)	$\frac{1}{K} \left(\frac{D}{\tau} \right)^{-1}$	-	-
Proporcional-Integral (PI)	$\frac{0.9}{K} \left(\frac{D}{\tau} \right)^{-1}$	3.33D	-
Proporcional-Integral-Derivativo (PID)	$\frac{1.2}{K} \left(\frac{D}{\tau} \right)^{-1}$	2.0D	1/2D

de la variable controlada respecto al set-point. Como el error está en función del tiempo que dura la respuesta, la suma del error (la integral) en cada instante se debe minimizar⁽¹⁾.

Por lo tanto se propusieron 4 ecuaciones para ello las cuales constituyen las cuatro integrales básicas para el ajuste de los parámetros del controlador.

II.9 LOS LAZOS DE REGULACIÓN APLICADOS A UN PROCESO

En todo proceso industrial existe una señal de proceso, una consigna y una acción de control. Estas tres variables están interrelacionadas entre sí por medio de lo que se denomina un lazo de regulación. Por ejemplo en la figura 21:

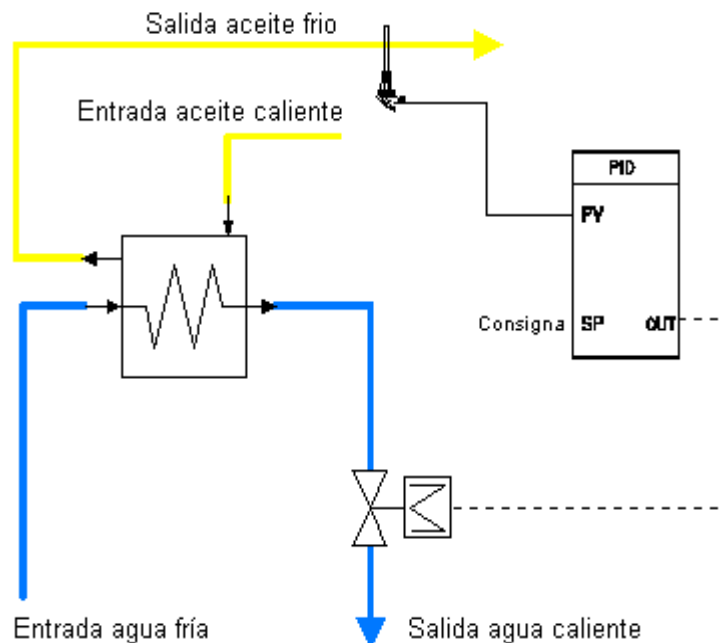


Figura 21. Ejemplo para el lazo de Regulación

En este caso la variable de proceso (**PV**, del inglés *Process Value*) es la temperatura de salida de aceite del intercambiador, la señal de consigna (**SP**, del inglés *Set Point*) es el valor de temperatura que nosotros queremos que tenga dicho aceite y la salida de control (**OUT**, o **CV**, *OUTput* o *Control Value*, respectivamente y en inglés) es la acción de control que va a producir la apertura o cierre de la válvula motorizada para que entre más o menos agua fría al intercambiador y de esa manera enfríe el aceite a la temperatura que nosotros queramos. La acción de control intentará que la diferencia entre la consigna SP y el valor de proceso PV se mínima e incluso nula; para ello se dispone de lo que se llama un bloque PID que en función de unos parámetros de ajuste internos variará la salida OUT de manera que así sea. Los bloques PID o bloques de regulación están hoy en día implementados en todos los autómatas y sistemas de supervisión y funcionan según un algoritmo matemático que difiere de unos a otros fabricantes.

Las siglas PID provienen de los tres parámetros de ajuste mas importantes del citado bloque, que son a saber, la banda o ganancia proporcional (P), el tiempo integral (I) y el tiempo derivativo (D).

La acción P va a generar una salida de control proporcional al error entre SP y PV. Si este parámetro es la Ganancia Proporcional, dicha acción será directamente proporcional al error; si el parámetro es la Banda Proporcional la acción de control será inversamente proporcional al error entre SP y PV. Hablando claro, para un error dado entre SP y PV, si el bloque PID trabaja con *Ganancia proporcional*, cuanto mayor sea el valor aquí introducido mayor será la acción de control. Por el contrario, si el bloque PID trabaja con *Banda Proporcional*, la acción de control será mayor cuanto menor sea el valor del dato introducido para este campo.

La acción I va a producir un cambio de la acción de control en el tiempo, es decir, va a hacer que la acción de control varíe en sentido ascendente o descendente aunque el error entre el SP y el PV sea el mismo. Al igual que en el caso anterior hay dos tipos de tiempos integrales, uno viene dado en repeticiones por minuto y otro en minutos por repetición y al igual que en el caso anterior, uno es inverso del otro.

La acción D va a variar la acción de control en función de la velocidad del proceso, esto es en función de la velocidad con que crece o decrece el error entre SP y PV.

Estas tres variables se definen en inglés como GAIN, RESET y RATE respectivamente.

Los parámetros explicados anteriormente son los básicos de todo lazo de regulación, aunque muchos fabricantes incluyen además de estos, otros con la idea de adecuar la PID al proceso requerido de tal modo que la acción de control sea la

correcta. Muchos bloques PID disponen de una función llamada autotuning que busca los parámetros idóneos de regulación para el proceso que estén controlando de manera automática.

Los parámetros explicados anteriormente son los básicos de todo lazo de regulación, aunque muchos fabricantes incluyen además de estos, otros con la idea de adecuar la PID al proceso requerido de tal modo que la acción de control sea la correcta. Muchos bloques PID disponen de una función llamada autotuning que busca los parámetros idóneos de regulación para el proceso que estén controlando de manera automática. Unos buenos valores de PID tienen que conseguir que el proceso esté estable sin castigar excesivamente la válvula de control.

II.10 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Automatismo, se define como el dispositivo eléctrico, electrónico, hidráulico, neumático, etc., que se coloca a un equipo para que funcione de manera automática, es decir lograr la automatización del mismo.

Automatización, es la incorporación de un dispositivo electrónico que se encarga de controlar el funcionamiento de un proceso basándose en una serie de elementos definidos previamente.

Autotuning, función dentro del bloque PID, programado en el PLC que busca los parámetros idóneos de regulación para el proceso que estén controlando de manera automática.

Calor Húmedo, Cs, es la capacidad calorífica de 1 lb de aire seco y la humedad que contiene.

Circuito abierto o lazo abierto, se refiere a la situación en la cual se desconecta el controlador del sistema, es decir, el controlador no realiza ninguna función relativa a cómo mantener la variable controlada en el punto de control.

Constante de tiempo del proceso (τ), parámetro relacionado con la velocidad de respuesta de proceso.

Control de circuito cerrado, se refiere a la situación en la cual se conecta el controlador al proceso; el controlador compara el punto de control (la referencia) con la variable controlada y determina la acción correctiva.

Control regulador, se utiliza para referirse a los sistemas diseñados para compensar las perturbaciones.

Controlador Lógico Programable (PLC), se define como toda máquina electrónica diseñada para controlar en tiempo real y en medios industriales procesos secuenciales.

Controlador Proporcional (P), son los controladores más simples ya que sólo tienen un parámetro de ajuste, Kc denominada Ganancia del Controlador.

Controlador proporcional-integral (PI), controlador proporcional al que se le añade la acción integral o de reajuste para eliminar la desviación con la que opera el controlador únicamente proporcional.

Controlador proporcional-integral-derivativo (PID), controlador PI al que se le añade otro modo de control que es la acción derivativa, también se conoce como rapidez de derivación o preactuación y tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso.

Fuente de Alimentación, es la encargada de suministrar la tensión y corriente necesarias tanto a la CPU como a las tarjetas.

Ganancia del proceso o ganancia en estado estacionario (K), parámetro que indica cuanto cambia la variable de salida por unidad de cambio en la variable de entrada; es decir, define la sensibilidad del proceso, está asociado con la personalidad del proceso y por lo tanto depende de las propiedades físicas y los parámetros de operación del mismo.

Ganancia última del controlador K_{CU} , se define como el producto de las ganancias de los elementos de lazo, y el período último de oscilación T_U .

Humedad Absoluta, H , es igual a las libras de vapor de agua transportadas por una libra de aire seco.

Humedad de Saturación, cuando la presión parcial del vapor de agua en el aire, a una temperatura dada es igual a la presión de vapor a la misma temperatura el aire está saturado y la humedad absoluta se designa como la humedad de saturación.

Lazo de Regulación, es lo que interrelaciona la señal del proceso, la consigna y la acción de control.

Módulos de salidas a relés, son usados en circuitos de corriente continua y alterna, están basados en la conmutación mecánica por la bobina del relé de un contacto directo normalmente abierto.

Módulos de salidas a Transistores a colector abierto. El uso de este tipo de módulos es exclusivo de los circuitos de c.c. Igualmente que en los de Triacs, es utilizado en circuitos que necesiten maniobras de conexión/desconexión muy rápidas.

Módulos de salidas a Triacs. Se utilizan en circuitos de corriente continua y corriente alterna que necesiten maniobras de comunicación muy rápidas.

Perturbación o trastorno, es cualquier variable que ocasiona que la variable de control se desvíe del punto de control.

Porcentaje de Humedad Relativa se define como la presión parcial de vapor de agua en aire, dividida entre la presión del vapor de agua a la temperatura dada.

Punto de control, es el valor que se desea tenga la variable controlada.

Rack, es el elemento donde se conectan todos los componentes del PLC.

Razón de asentamiento de un cuarto, representa la razón de amplitud entre dos oscilaciones sucesivas.

Scan, es el tiempo que transcurre entre el principio y el final de ejecución del programa.

Secado, es la separación de un líquido de un sólido, por evaporación.

Sistema MMI (Man Machine Interface), es el interfaz de unión entre el operario y la máquina. Puede ser un panel de operador ó una computadora (PC), pero en ambos casos comunican y transmiten datos a y desde el PLC.

Temperatura de Bulbo Húmedo es la temperatura de equilibrio dinámico obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor por convección, a la misma, es igual que la velocidad de transferencia de masa que se aleja de tal superficie.

Tiempo Muerto, es el intervalo corto o largo durante el cual el sistema no responde.

Unidad de Procesamiento Central (CPU), es el cerebro del PLC y consta de uno o varios microprocesadores (según fabricante) que se programan mediante un software propio.

Variable controlada, es la variable que se debe mantener o controlar dentro de algún valor deseado.

Variable manipulada, es la variable que se utiliza para mantener a la variable controlada en el punto de control.

Watchdog, es un temporizador interno que vigila que este programa se ejecute de principio a fin y que el tiempo de ejecución del programa de usuario no exceda un tiempo máximo determinado.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos de este proyecto se realizó primero un estudio de ingeniería conceptual, donde se hizo una descripción del proceso actual:

Se definió el objetivo en estudio describiendo el alcance de re-instrumentación, sustitución de instrumentos existentes y se definieron los nuevos instrumentos a utilizar. Para ello se describió detalladamente el sistema actual a través de los diagramas de flujo del proceso (DFP), panel de control y funciones asociadas. Se describió la interfaz humana utilizada del sistema actual y las alarmas asociadas al proceso de producción. Se enumeró la secuencia de arranque y parada de la línea. Se verificaron los requerimientos de infraestructura física para la consola de comunicación, el espacio para el montaje de instrumentos y la posibilidad de cableado para las señales.

En función de un análisis de todo el estudio se elaboró un diagnóstico del proceso actual.

Se verificaron los requerimientos básicos de Infraestructura física dentro de los cuales estaban el tablero de control, espacio para la interfaz humana que se instaló, espacio para el montaje de instrumentos y la posibilidad de cableado para las señales.

Luego se hizo el estudio de ingeniería básica y de detalle donde se ejecutó el trabajo para realizar el proyecto, que se inicia luego de la ingeniería conceptual; el objetivo de esto fue definir la adquisición de los nuevos instrumentos, esto se hizo dividiendo en varias disciplinas:

⌘ **Levantamiento de campo:** determinando el estado actual de las instalaciones y se detectando el grado de actualización tecnológica de la línea.

Previamente a la visita de campo de las instalaciones de la planta se hizo una revisión de los documentos disponibles a fin de familiarizarse con el proceso y las instalaciones.

En cuanto a la instrumentación se ejecutaron las siguientes actividades:

- € Revisar la lista de instrumentos existente, verificando que la lista de éstos reflejara el estado actual de la línea de producción.
- € Revisar la instrumentación de la planta definiendo el grado de obsolescencia de la instrumentación actual. Además se verificaron cada uno de los elementos del sistema, incluyendo los elementos finales de control.
- € Definir los instrumentos existentes que se sustituyeron, definiendo los criterios y justificación de la sustitución.
- € Revisar los paneles y luces existentes, para verificar el estado de operación, como los botones de parada de emergencia y luces de indicación de operación de equipos de la línea de producción indicados en los diagramas de cada secador.

En cuanto a la electricidad se ejecutaron las siguientes actividades:

- € Verificar que el plano eléctrico reflejara el estado actual de los sistemas AC, DC y puesta a tierra.
- € Revisar el espacio disponible para la ubicación de cajas de conexionado, verificando las áreas clasificadas y las instalaciones eléctricas existentes.

En cuanto a los sistemas se hicieron las siguientes actividades:

- € Definir las señales que se llevarán al sistema de control, definiendo los criterios y justificación de selección de cada señal clasificándola como: entrada/salida analógica ó entrada/salida digital.
- € Revisar la arquitectura de la red propuesta, verificando la capacidad disponible en la red de comunicación, en módulos I/O, para la programación del nuevo sistema de control.

⌘ **Disciplina de Instrumentación:** aquí se ejecutaron las actividades relacionadas con la instrumentación de la línea como revisión de instrumentos

existentes, especificación de nuevos instrumentos y rutas de cables para el nuevo sistema de control mediante las siguientes actividades:

- € Elaborar los diagramas de tuberías e instrumentación para el nuevo sistema (PLC incorporado)
- € Elaborar una lista de instrumentos actualizada: colocando los instrumentos que se instalarán para el nuevo sistema de control.
- € Mostrar una figura del diagrama de ubicación de los instrumentos dentro del panel de control.
- € Presentar los diagramas de detalle de instalación mecánica y eléctrica de los nuevos instrumentos a colocar.

⊗ **Disciplina Aplicación:** aquí se ejecutaron las actividades relacionadas con el control del proceso, incluyendo especificaciones de proceso para instrumentos, filosofía de operación y control, estrategias de control, protección de equipos, parada de emergencia, etc., realizando las actividades que siguen:

- € Elaborar la filosofía de operación y control del nuevo sistema, incluyendo el Controlador Lógico Programable (PLC), sensor, transductor, panel de control y los tipos de señales que intervienen en dicho sistema.
- € Elaborar las estrategias de control regulatorio, describiendo funcionalmente las estrategias de control para la temperatura, la humedad relativa y la temperatura del agua de calentamiento. También se definieron los algoritmos de control que se utilizaron para la configuración de las estrategias de control en el sistema supervisorio como lo es la consola de control. Se definieron los sistemas para las variables involucradas en el sistema de control. Se elaboraron también las hojas sama de cada estrategia las cuales incluyen nombre de las siglas, variable controlada, variable manipulada, variables de perturbación, tipo de medidor, rango de la variable medida, tipo de controlador, elemento final de control y justificación del lazo.
- € Descripción detallada del sistema de arranque y parada, variables asociadas y botones asociados al nuevo sistema de control.

⌘ **Disciplina Eléctrica:** esta disciplina tuvo por objetivo definir y ejecutar las actividades relacionadas con el sistema y suministro de potencia e instalaciones eléctricas para el proceso para ello se realizó lo siguiente:

- € Explicar el sistema de suministro de potencia para la línea de producción.
- € Actualizar los planos eléctricos existentes, agregando los nuevos elementos y cables instalados para el nuevo sistema de control.

⌘ **Disciplina Sistemas:** aquí se definieron y ejecutaron las actividades relacionadas con los sistemas de control y protección, mediante el esquema inicial de automatización y especificaciones funcionales del nuevo sistema de control esto se logró mediante las siguientes actividades:

- € Definir los criterios de selección de señales para el nuevo sistema de control y las variables del proceso asociadas a esta señales.
- € Definir los criterios de configuración y programación del nuevo sistema de control para el lenguaje utilizado por el PLC incluyendo direccionamiento de las variables con sus parámetros asociados para la construcción del programa de control y para la consola de comunicación.
- € Elaborar una lista inicial de variables del sistema de control, clasificando el tipo de variable, su palabra asociada el el lenguaje del PLC y la asociación de estas para visualizarlas en la consola.
- € Elaborar una lista de entradas/salidas para la línea en general, su elemento asociado y su direccionamiento.
- € Elaborar una lista de alarmas con su variable asociada para el programa del PLC y la asociación a la consola de operación.
- € Explicar la transferencia del programa del PC al PLC.

⌘ **Especificaciones Generales para Construcción:** en ésta parte se describieron los requerimientos mínimos y las responsabilidades para la realización de los trabajos de construcción estos fueron:

- € Montaje e instalación de instrumentos.
- € Pruebas de instrumentos y sistema de control.

- € Tendido de cables para el suministro de energía eléctrica a los equipos del sistema de control y protección.
- € Detalles de instalación e interconexión de equipos.
- € Suministro de materiales menores para ejecución de montajes.
- € Comprobación de las señales para el control instalado.