



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de ingeniería
Escuela de ingeniería mecánica eléctrica

DISEÑO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE TORTILLAS DE HARINA

Leonel Alejandro Morales Requena

Asesorado por el Ing. Otto Fernando Andrino González

Guatemala, agosto de 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN
DE TORTILLAS DE HARINA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LEONEL ALEJANDRO MORALES REQUENA

ASESORADO POR EL ING. OTTO FERNANDO ANDRINO GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2007

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

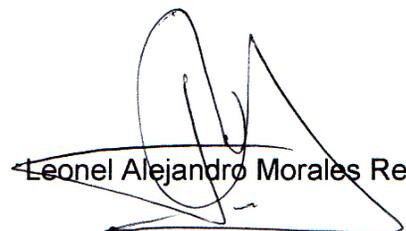
DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernandez
EXAMINADOR	Ing. Julio Cesar Molina Saldaña
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
SECRETARIO	Ing Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los conceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE TORTILLAS DE HARINA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 9 de mayo de 2005


Leonel Alejandro Morales Requena

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 14 de mayo de 2007

Ingeniero
Francisco González
Coordinador Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **Diseño del control automático del proceso de producción de tortillas de harina**, elaborado por el estudiante Leonel Alejandro Morales Requena.

El mencionado trabajo llena los requisitos para dar mi aprobación, e indicar que el autor y mi persona somos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Atentamente,


Ing. Otto Fernando Andriano González
ASESOR

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 05 de julio 2007.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **Diseño del control automático del proceso de producción de tortillas de harina, desarrollado por el estudiante; Leonel Alejandro Morales Requena,** por considerar que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área de Electrotécnica

FJGL/sro





El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación de la estudiante; Leonel Alejandro Morales Requena titulado: **Diseño del control automático del proceso de producción de tortillas de harina**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martinez

DIRECTOR



GUATEMALA, 13 DE JULIO 2,007.

Universidad de San Carlos
de Guatemala

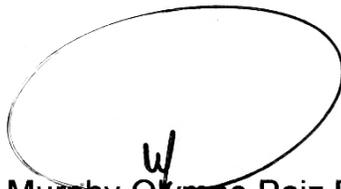


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.262.07

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE TORTILLAS DE HARINA**, presentado por el estudiante universitario **Leonel Alejandro Morales Requena**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy  Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, agosto de 2007

/cc

AGRADECIMIENTOS A

- DIOS** Por darme la sabiduría para llegar a este logro, fortaleza en los momentos difíciles y ser mi guía en la vida.
- MI ESPOSA** Por su apoyo incondicional, su comprensión y el aliento para seguir adelante.
- SEBASTIAN** Ángel que envió Dios para llenar de alegría mi vida
- MI PADRE** Por haberme enseñado el camino con el ejemplo de responsabilidad, serenidad y rectitud para afrontar la vida
- MI MADRE** Por ser ejemplo de empeño, de perseverancia y coraje para lograr lo deseado en la vida.
- MIS HERMANOS** Por todo el apoyo que me brindaron y que siempre han estado allí cuando los he necesitado, sin ustedes no hubiese logrado todo lo que he logrado hasta ahora
- MIS SOBRINOS** Por ser luz de esperanza para la familia
- LAS TÍAS** Gracias por todo el apoyo que nos han dado.
- MI ASESOR** Por su aportación, colaboración y el tiempo brindado para el desarrollo de este trabajo de graduación

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE ABREVIATURAS	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE TORTILLAS DE HARINA	1
1.1. Mezclado	1
1.2. Dividido	1
1.3. Boleado	1
1.4. Reposado (fermentado)	2
1.5. Prepresado	2
1.6. Presado (formado)	2
1.7. Cocción	2
1.8. Enfriamiento	3
1.9. Apilado y embolsado	3
2. PROCESO ACTUAL	5
2.1. descripción del funcionamiento actual del proceso	5
2.2. planteamiento de la necesidad	6
2.3. análisis de la problemática actual	7

2.4.	descripción de las variables a medir	7
2.4.1.	Peso	8
2.4.2.	Flujo	8
2.4.3.	Presión	9
2.4.4.	Temperatura	10
3.	ANÁLISIS DEL PROCESO DE AUTOMATIZADO	13
3.1.	Descripción de los sensores a utilizar	13
3.1.1.	Sensores de proximidad	13
3.1.1.1.	Sensor inductivo	13
3.1.1.2.	Sensor Capacitivo	14
3.1.1.3.	Sensor Fotoeléctrico	14
3.1.2.	Micorswich	15
3.1.3.	Termopar	15
3.1.4.	Sensor de Flujo de turbina axial	16
3.1.5.	Strain Gage (Galga Extensiométrica)	16
3.2.	Descripción de los elementos finales de control	17
3.2.1.	Motor de inducción	17
3.2.2.	Motores Modulantes (Servomotores)	18
3.2.3.	Variador de velocidad	19
3.2.4.	Válvulas	22
3.2.5.	Actuadores	23
3.2.5.1.	Actuadores eléctricos	23
3.2.5.2.	Actuadores neumáticos	24
3.2.5.3.	Actuadores hidráulicos	24
3.3.	Modos de control	25
3.3.1.	Control <i>on-off</i>	25
3.3.2.	Control PID (proporcional, integral y derivativo)	25

4. SISTEMAS DE CONTROL	31
4.1. Tipos de sistemas de control	33
4.1.1. Por su tecnología de control	33
4.1.1.1. Control mecánico	33
4.1.1.2. Control neumático	33
4.1.1.3. Control hidráulico	33
4.1.1.4. Control eléctrico	34
4.1.1.5. Control electrónico	34
4.1.2. Por la verificación del estado de la salida	34
4.1.2.1. Lazo cerrado	34
4.1.2.2. Lazo abierto	35
4.1.3. Por el tipo de señal	35
4.1.3.1. Analógicos	35
4.1.3.2. Digitales	36
4.1.4. Por la relación entre los elementos	36
4.1.4.1. Cableados	36
4.1.4.2. Programados	36
4.2. Control Lógico Programable (PLC)	36
4.2.1. Entradas	37
4.2.2. Salidas	38
4.2.3. Unidad central de procesamiento (CPU)	38
4.2.4. Dispositivos de programación:	38
4.2.5. Interfase	39
4.3. Ciclo de operaciones:	40
4.4. Lenguajes de programación para un autómata	41
4.4.1. Lenguaje de contactos o KOP	42
4.4.2. Lenguaje de bloques de funciones o FUP	43
4.4.3. Lenguaje de instrucciones o AWL	44

4.5. Pasos para el diseño e implementación de un control automático	45
4.6. Criterios para la selección del procesador	48
4.7. Control automático a utilizar	49
4.7.1. Hardware	49
4.7.1.1. Tipo de procesador	49
4.7.1.2. Tipo de entradas de datos a utilizar	50
4.7.1.3. Tipo de salidas de salidas a utilizar	51
4.7.2. Software	52
4.7.2.1. Control de pasaje de harina	52
4.7.2.2. Control de flujo de agua	53
4.7.2.3. Ciclo de mezcladora	54
4.7.2.4. Ciclo de Maquinado	55
4.7.2.5. Ciclo de pre-prensado y prensado	57
4.7.2.5.1. Ciclo de canastillas	58
4.7.2.5.2. Ciclo de banda	58
4.7.2.5.3. Ciclo de plancha	59
4.7.2.6. Control de horno y enfriador	60
4.7.2.7. Control de temperatura	61
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sensores inductivos	14
2.	Sensores capacitivos	14
3.	Sensores fotoeléctricos	15
4.	Microswichs	15
5.	Termopar	16
6.	Sensor de flujo de turbina axial	16
7.	Galga extensiométrica	17
8.	Motor inductivo de jaula de ardilla	18
9	Motor modulante	19
10	Etapas del variador de velocidad	20
11.	Etapas del variador de velocidad esquema trifásico	20
12.	Gráfico de voltaje PWM	21
13.	Forma de onda de corriente a raíz de voltaje PWM	21
14.	Diagrama equivalente de bobina de un motor y relación Voltios/Hertz	22
15.	Actuador eléctrico	24
16.	Actuador neumático	26
17.	Gráfico Variable controlada Vrs. Elemento final de control	27
18.	Gráficos comparativos ganancia 0.5 y ganancia 2	31
19.	Componentes de un sistema de control	32
20.	Pasos del control de procesos	37
21.	Diagrama de bloques y apariencia física de un PLC	37
22.	Módulo de entradas y salidas SLC 500	41
23	Ciclo de exploración del programa	42

24	Símbolos básicos de representación en lenguaje Kop	43
25	Diagrama eléctrico de escalera	44
26	Diagrama de bloques	45
27.	Instrucción de lenguaje AWL	45
28.	Comparativo diagrama de escalera y lenguaje de instrucciones	45
29.	Diagrama de flujo para la implementación de un control automático	47
30.	Configuración de procesador en el Programa Logic500	49
31.	Configuración de Rack en el Programa Logic500	50
32.	Configuración entradas discretas en el Programa Logic500	50
33.	Configuración entradas analógicas en el Programa Logic500	51
34.	Configuración salidas discretas en el Programa Logic500	51
35.	Configuración salidas analógicas en el Programa Logic500	52
36.	Control de pesaje de harina	53
37.	Control de flujo de agua	54
38.	Control de ciclo de mezcladora	55
39.	Control de tamaño de tortilla	56
40.	Control del ciclo de maquinado	57
41.	Control del ciclo de pre-prensado y prensado	57
42.	Control del ciclo canastillas	58
43.	Control del ciclo de banda	59
44.	Control del ciclo de plancha	60
45	Control de la seguridad del ciclo de plancha	60
46	Control de horno y enfriador	61
47	Horno	61
48	Control de lazo cerrado	62
49	Habilitación de canal de medición módulo de termopares	62
50	Motor Modulante y boquillas de quemador del Horno	63
51	Control de temperatura de comal con PID	63
52	Configuración de PID	64

53	Control temperatura de plancha superior y plancha inferior	70
54	Control temperatura de enfriador	70
55	Diagrama de control de temperatura	71
56	Nomenclatura de diagramas de control	72

TABLAS

I	Factores de conversión de unidades de presión	10
II	Factores de conversión de unidades de temperatura	11
III	Comparativo Incremento proporcional, banda proporcional	27
IV	Características de procesadores para SLC500	48
V	Especificaciones de procesadores para SLC500	49

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Grados centígrados
PSI	Libra sobre pulgada cuadrada
RPM	Revoluciones por minuto
PWM	<i>Pulse Wide Modulation</i> (Modulación de ancho de pulso)
AC	<i>Altern Current</i> (Corriente Alterna)
DC	<i>Direct Current</i> (corriente directa)
PID	<i>Proportional integrated derivative</i> (proporcional, integral y derivativo)
PLC	<i>Program Logic Controler</i> (Controlador lógico programable)
CPU	<i>Central Process Unit</i> (Unidad central de procesamiento)

RESUMEN

En la industria de procesamiento de alimentos, la calidad de los productos es básica para su aceptación por parte del consumidor.

El control de los procesos es una herramienta básica para alcanzar dichos objetivos de calidad; la cual debe de ser mejor cada día, para poder competir en un mercado más exigente.

En dicha tarea, la automatización de los procesos tiene un papel importante en la reducción de las variables de proceso ajustadas y/o controladas por el ser humano, dando como resultado una estandarización en la calidad de los productos.

En el presente trabajo de graduación se desarrolló un control automático efectivo y confiable para una línea de producción de tortillas de harina, en el proceso se analizó el proceso como un todo, se analizó también, los subprocesos y en estos las variables que los afecta a cada uno en particular con esto se desarrollo el control para obtener un proceso continuo y eficiente.

OBJETIVOS

General

Desarrollar el diseño del control automático de una línea de producción de tortillas de harina

Específicos

1. Establecer las variables de proceso necesarias para diseñar el control automático de una línea de producción de tortillas de harina.
2. Describir los instrumentos de campo a utilizar en el control automático de tortillas de harina.
3. Describir los elementos finales de control a utilizar en el control del proceso de producción de tortillas de harina.
4. Desarrollar un control eficiente de la temperatura del horno de cocción.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo describe los fundamentos básicos para la realización de un control automático, para una línea de producción de tortillas de harina eficiente y confiable, capaz de absorber los cambios que la industria actual demanda de los procesos.

El primer capítulo trata sobre todos los subprocesos que componen la producción de tortillas de harina desde las materias hasta el producto terminado.

En el segundo capítulo se describe el funcionamiento del proceso actual y se definen las variables del proceso que fueron tomadas en cuenta.

En el tercer capítulo trata sobre los sensores y los elementos finales de control que son utilizados en la automatización de procesos, así como también, los modos de control *on-off* y el control Proporcional, Integral y derivativo (PID)

En el capítulo cuatro se describen los sistemas de control según su tecnología, la verificación del estado de la salida, por el tipo de señal, se describen los controles lógicos programables que son la base de la automatización de procesos industriales actuales, los elementos que componen este, la forma en que trabajan internamente, las formas y lenguajes de programación., se describe los elementos utilizados en la automatización del proceso de producción de tortillas de harina, el hardware y la descripción del funcionamiento del software, esto da como resultado el control de un proceso dinámico y eficiente

1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE TORTILLAS DE HARINA

1.1. Mezclado

Esta es la primera fase de la producción de tortillas de harina, consiste en incorporar todos los ingredientes y darle una consistencia adecuada a la masa para que pueda ser trabajada y formada con facilidad.

Esta operación cuenta con las siguientes etapas:

- Incorporación: en esta etapa se incorpora la harina con los ingredientes secos, agua, etc., se realiza a baja velocidad.
- Desarrollo: en esta etapa se obtiene una consistencia suave y elasticidad en la masa, se realiza a alta velocidad.

1.2. Dividido

El dividido es la etapa en la cual la masa elaborada en el mezclado es dividida en piezas de peso estandarizado, el peso dividido define el diámetro y el espesor de las tortillas.

En esta etapa se define el ritmo de la línea de producción puesto que define las piezas que serán divididas por minuto.

1.3. Boleado

En esta etapa se sellan las piezas divididas y se convierten en esferas de masa, esto con el fin de obtener simetría al momento de prensarlas.

Para un buen resultado en esta etapa, se requiere que las masas estén bien formuladas y desarrolladas en el mezclado.

1.4. Reposado (fermentado)

Proceso en el cual las bolas de masa divididas y boleadas son transportadas en canastillas en el interior de una cámara en condiciones ambientales controladas.

En esta etapa se busca que las piezas de masa lleguen a ser menos elásticas y más extensibles. Un reposado inapropiado resulta en tortillas de forma irregular con áreas translucidas y menos hinchadas.

1.5. Prepensado

El prepensado toma lugar transfiriendo las piezas de masa relajadas y/o acondicionadas sobre la banda caliente de la prensa que se mueve entre placas hidráulicas y su principal función es fijar a una distancia controlada las piezas de masa aplanándolas sin llegar a formar tortillas y así mantener las bolas de masa equidistantes entre si.

1.6. Prensado (formado)

El prensado consiste en aplastar las piezas de masa hasta formar una pieza plana y circular con una piel delgada sobre la superficie cruda que sella al límite de no liberar el vapor de agua y dióxido de carbono, esto causa que la tortilla se hinche y expanda durante el horneado sin romperse.

En esta operación se definen los estándares de calidad en cuanto a diámetro, espesor y simetría de las piezas de masa mediante presión, temperatura y tiempo de planchado controlados.

1.7. Cocción

Esta operación consiste en colocar las piezas de masa crudas en una cámara con temperatura controlada durante un tiempo definido esto con el fin de lograr pérdida de humedad, desnaturalización de las proteínas y con esto la

estructura final de las tortillas (plana, circular, apariencia blanca y con ligeras marcas de cocción)

1.8. Enfriamiento

Esta etapa consiste en llevar las piezas cocidas a una temperatura en la cual puedan ser embolsadas.

Esto con el fin de evitar condensaciones dentro de las bolsas selladas que den como resultado la proliferación de hongos y con esto se reduzca la vida útil de los paquetes en anaquel.

1.9. Apilado y embolsado

En esta operación las tortillas cocidas y enfriadas a temperatura ambiente se cuentan, embolsan y se sellan, lo cual es definitivo para la conservación de las características del producto durante su vida de anaquel.

2. PROCESO ACTUAL

2.1. Descripción del funcionamiento actual del proceso

El mezclado se realiza en una mezcladora de aspas o ejes rectos las cuales giran a 40 y 80 rpms mediante un motor de dos velocidades.

El tiempo de mezclado en velocidad alta y baja esta determinado por dos timers físicos colocados en un tablero los cuales dan margen de error por cualquier mala operación de los paneles individuales.

La masa formada en el mezclado se transporta al sistema de dividido en el que se utiliza una divisora de tambor giratorio con pequeños pistones divisores los cuales están sujetos a presión negativa en el momento de dividir la masa y a presión positiva al momento de la descarga de la pieza dividida, en este punto se define el ritmo de la línea en cuanto a piezas por minuto las cuales dependen directamente de la velocidad de rotación del tambor puesto que realiza 8 cortes por revolución, otro factor que se controla en este punto es el nivel de masa en la tolva de la divisora.

Las piezas divididas pasan a una mesa de boleado de banda sanitaria sinfin con cuatro carriles compuestos por dos guías de plástico dispuestas en zig-zag en este punto se controla la velocidad de la banda sanitaria para garantizar un sellado completo a las piezas de masa que después son depositadas al reposador que consiste en un transportador de cadenas con eslabones compuestos por 4 cavidades en las cuales se depositan las piezas selladas para que se relajen y liberen las tensiones internas generadas en el boleado, este equipo debe de estar sincronizado con la divisora y con la mesa de boleado para no perder el ritmo de la línea por lo que se debe de controlar la velocidad a la que viajan las canastillas, después son transferidas al preensador para ser fijadas en la posición en la que serán prensadas, en este

punto se cuenta el número de canastillas y se les da vuelta sobre una banda con recubrimiento de teflón y después son fijadas por medio de un pistón neumático después arranca la banda para colocar las piezas preplanchadas en medio de dos placas de acero de alto carbón las cuales están a 210 °C ,entonces las placas se cierran por medio de un pistón hidráulico durante un tiempo establecido y una presión controlada, de esta operación se obtienen piezas redondeadas y aplanadas (tortillas), después las placas se separan y la banda arranca para depositar las tortillas en el siguiente equipo que es una cámara que se encuentra a una temperatura de 140 °C y posee una banda metálica dentro por donde las tortillas se mueven dentro por un tiempo determinado para que estas se cocinen por completo, se debe de controlar la velocidad de la banda para mantener la sincronía y la temperatura de la cámara después las tortillas se enfrían en una banda transportadora plástica la cual da el tiempo necesario para que las tortillas se enfríen a temperatura ambiente para poder ser llevadas al área de empaque en donde son contadas y colocadas en bolsas con una cantidad de tortillas especificada para después ser sellada.

2.2. Planteamiento de la necesidad

El proceso de producción de tortillas de harina tiene varios pasos para transformar la materia prima en producto terminado, una variación en el proceso significa un ajuste general de todos estos pasos.

Entre los problemas que se tienen están:

- Cuando las condiciones de proceso cambian y se tiene que hacer algún cambio al mismo, la puesta a tiempo de todos los pasos cobra demasiado tiempo, que es en realidad dinero que se deja de percibir además de generar bajas que igualmente repercute en costos.
- El aumento de la demanda exige que los tiempos de ajuste sean cada vez menores con el fin de minimizar tiempos muertos de la maquinaria.

- Además del aumento de producción también se tiene como meta una mejor calidad de todos los productos que se elaboran.
- Se debe de tener una alta calidad, según los estándares establecidos, la misma se debe mantener a lo largo del tiempo, por lo que todas las variables deben de estar controladas en todo momento

2.3. Análisis de la problemática actual

Se tienen varios pasos, los cuales cuentan con controles independientes, por lo que se debe de tener una perfecta sincronía entre cada uno de estos puesto que si existiera una pequeña alteración en cualquiera de estos pasos la sincronía se ve afectada en consecuencia se tienen bajas de productos en transferencias, de igual forma cuando las condiciones de proceso cambian y se tiene que hacer algún cambio al mismo, la puesta a tiempo de todos los pasos cobra demasiado tiempo que es en realidad dinero que se deja de percibir además de generar bajas que igualmente repercute en costos; además de que no permite tener una calidad estable durante todo el tiempo destinado a producción.

Partiendo de esto se sugiere la colocación de un control automático de este proceso que permita realizar un monitoreo en tiempo real de todas las variables de proceso que permitan controlar por medio de los elementos finales de control y así poder estabilizar el mismo.

2.4. descripción de las variables a medir

Las variables son los valores que afectan las entradas y las salidas de los procesos, estas pueden ser monitoreadas y controladas.

Las variables que se tomaran en cuenta son el peso, el flujo, la presión y la temperatura.

2.4.1. Peso

Se denomina peso de un cuerpo a la fuerza que ejerce la gravedad sobre dicho cuerpo a una aceleración normal de gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$

A diferencia de la masa, el peso varía dependiendo de la posición relativa del objeto o de su distancia a la Tierra, de si la velocidad con que se mueve el objeto varía con respecto al movimiento de nuestro planeta y si, obviamente, el objeto está bajo la acción de una gravedad de magnitud distinta a la de la Tierra (otro planeta, por ejemplo). En las proximidades de la Tierra, y mientras no haya una causa que lo impida, todos los objetos caen animados de una aceleración, g , por lo que están sometidos a una fuerza constante, que es el peso.

Los objetos diferentes son atraídos por fuerzas gravitatorias de magnitud distinta. La fuerza gravitatoria que actúa sobre un objeto de masa m se puede expresar matemáticamente por la expresión:

$$P = m \cdot g$$

2.4.2. Flujo

Se define como la cantidad de sustancia que pasa por determinado punto en la unidad de tiempo.

Es identificado como:

- Flujo volumétrico: es el volumen de sustancia que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.
- Flujo másico: es la masa de sustancia que pasa por un área dada en la unidad de tiempo

La razón del flujo de una sustancia puede ser descrita usando un número de términos

- Pie por segundo
- Galones por minuto
- Kilos por minuto

2.4.3. Presión

Se define como la fuerza ejercida sobre unidad de área. La fuerza puede ser ejercida por líquidos, gases o sólidos. Matemáticamente esta definida como:

$$P = F / A$$

- P = presión
- F = fuerza
- A = área

Existen dos conceptos que se manejan en la medición de la presión:

- Presión manométrica o gauge: es la presión medida por encima de la presión atmosférica.
- Presión absoluta: es la presión atmosférica más la presión manométrica.

La presión atmosférica es de aproximadamente de 101.325 pascales.

Hay varias unidades de presión utilizadas en la definición se presión abajo unas de ellas

Tabla I. Factores de conversión de unidades de presión

Unidades	Pascal	Bar.	N/mm ²	kp/m ²	kp/cm ² (=1 atm)	atm	Torr
1 Pa (N/m ²) =	1	1×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁸	0.102	0.102×10 ⁻⁴	0.987×10 ⁻⁵	0.0075
1 bar. (daN/cm ²) =	100	1	0.1	10200	1.02	0.987	750
1 N/mm ² =	106	10	1	1.02×10 ⁵	10.2	9.87	7500
1 kp/m ² =	9.81	9.81×10 ⁻⁵	9.81×10 ⁻⁸	1	1×10 ⁻⁴	0.968×10 ⁻⁴	0.0736
1 kp/cm ² (1 atm) =	98100	0.981	0.0981	10000	1	0.968	736
1 atm (760 Torr) =	101325	1.013	0.1013	10330	1.033	1	760
1 Torr (mmHg) =	133	0.00133	1.33×10 ⁻⁴	13.6	0.00132	0.00132	1

Está la unidad definida como PSI definida como Lb/pul² y las obsoletas unidades de presión, como los milímetros de mercurio, que están basadas en la presión ejercida por el peso de algún tipo estándar de fluido bajo cierta gravedad estándar. Son intentos de definir las lecturas de un manómetro. Estas no deben ser utilizadas para propósitos científicos o técnicos, debido a la falta de repetibilidad inherente a sus definiciones.

2.4.4. Temperatura

La temperatura es un parámetro físico descriptivo de un sistema que caracteriza el calor, o transferencia de energía térmica, entre ese sistema y otros. Desde un punto de vista microscópico, es una medida de la energía cinética asociada al movimiento aleatorio de las partículas que componen el sistema.

Cuando dos sistemas en contacto están a la misma temperatura, se dice que están en equilibrio térmico y no se producirá transferencia de energía. Cuando existe una diferencia de temperatura, la energía tiende a transferirse del sistema de mayor temperatura al de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico.

Una definición corta define a la temperatura como la medida de cuanto caliente o cuan frío esta una sustancia.

En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el kelvin. Sin embargo, está muy generalizado el uso de otras escalas de temperatura, concretamente la escala Celsius (o centígrada), y, en los países anglosajones, la escala Fahrenheit. Estas fueron desarrolladas basadas en el punto de congelamiento y ebullición del agua.

Tabla II. Factores de conversión de unidades de temperatura

Escala	Grados en que congela	Grados en que ebulle	Rango
Celsius	0 ° C	100 ° C	100 ° C
Fahrenheit	32 ° F	212 ° F	180 ° F

3. ANÁLISIS DEL PROCESO DE AUTOMATIZADO

3.1. Descripción de los sensores a utilizar

Un sensor es un transductor que detecta manifestaciones de cualidades o fenómenos físicos, como la energía, velocidad, aceleración, tamaño, cantidad, posición, etc. y las transforma en unidades que pueden ser medidas y procesadas por un computador, estos pueden tener como salida una señal discreta o una señal proporcional de la magnitud medida

3.1.1. Sensores de proximidad

Son elementos los cuales detectan la presencia de un objeto sin necesidad que esté en contacto con el sensor, al activarse el sensor cierra un interruptor y emite una señal discreta de esta presencia

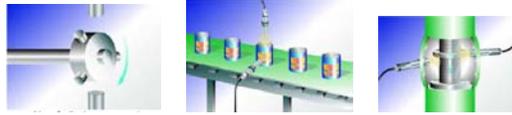
Existen varios tipos entre los cuales podemos mencionar los sensores inductivos, sensores capacitivos y fotoeléctricos entre otros.

3.1.1.1. Sensor inductivo

Este tipo de interruptor detecta objetos metálicos por medio de la variación en el campo magnético alterno que se genera dentro del sensor y surge por la cara de este, cuando un material es buen conductor eléctrico provoca un cambio o eliminación de este lo cual es analizado por el sensor dando como resultado una detección.

No son afectados por la temperatura, ruidos, luz o líquidos, por lo que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones.

Figura 1. Sensores inductivos

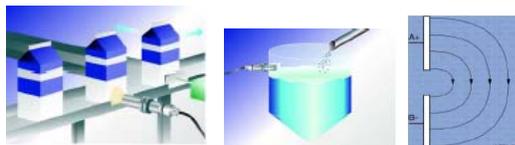


3.1.1.2. Sensor capacitivo

Este tipo de interruptor detecta objetos metálicos y no metálicos de cualquier tipo ya sea este sólido, polvo o líquido.

La superficie activa de un sensor capacitivo se forma con dos electrodos metálicos concéntricos, similares a los electrodos de un condensador desplegado. Cuando un objeto se aproxima a la superficie activa del sensor, penetra en el campo eléctrico que hay delante de la superficie de los electrodos transformándose en una detección.

Figura 2. Sensores capacitivos



3.1.1.3. Sensor Fotoeléctrico

Este tipo de interruptores reaccionan a los cambios en la cantidad de luz que recibe. Consta de un diodo emisor de luz y un diodo receptor de luz. Se acciona cuando se interrumpe la señal de luz en el receptor o cuando esta se refleja en algún objeto.

Este sensor detecta objetos sin tener en cuenta su composición (metal, plástico, papel, madera, etc.)

Figura 3. Sensores Fotoeléctricos



3.1.2. Micorswich

Estos son utilizados como sensores de posición, como sensores de seguridad en cierre de puertas, accionadotes de final de carrera, etc.

La señal discreta de salida es emitida cuando el interruptor es accionado por una fuerza mecánica

Existen varios tipos de accionadotes según el accionamiento, tales como de palanca, pulsador, etc.

Figura 4. Microswichs



3.1.3. Termopar

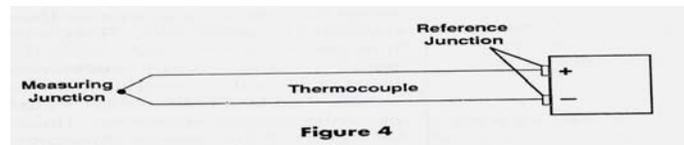
Un termopar es un circuito formado por dos metales distintos que produce un voltaje entre ellos cuando se les aplica calor (Efecto Seebeck).

En 1822 el físico estoniano Thomas Seebeck descubrió accidentalmente que la unión entre dos metales genera un voltaje que es función de la temperatura.

Los termopares funcionan bajo este principio, el llamado efecto Seebeck. Si bien casi cualquier par de metales pueden ser usados para crear un termopar,

se usa un cierto número debido a que producen voltajes predecibles y amplios gradientes de temperatura.

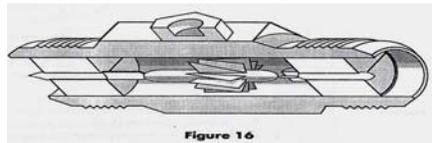
Figura 5. Termopar



3.1.4. Sensor de Flujo de turbina axial

Es un instrumento colocado en un conducto o corriente que mide el volumen total que ha circulado por el conducto sobre el que están dispuestos. El fluido circulante mueve partes mecánicas móviles (hélices) que traducen este movimiento al contador donde es traducido a volumen y puede ser visualizado o utilizado por un computador.

Figura 6. Sensor de flujo de turbina axial



3.1.5. Strain gage (galga extensiométrica)

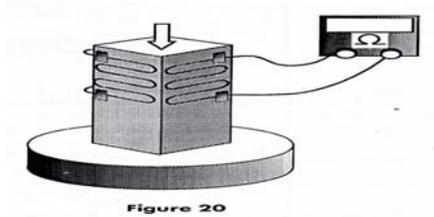
Una galga extensiométrica es un dispositivo electrónico que aprovecha el efecto piezorresistivo para medir deformaciones. Ante una variación en la estructura del material de la galga se producirá una variación de su resistencia eléctrica proporcionalmente a la fuerza aplicada.

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones de cobre y níquel, platino y silicio

Su principal ventaja es su linealidad; también presentan una baja impedancia de salida

Está basado en el principio de que un cable puesto bajo tensión, su resistencia varía proporcionalmente.

Figura 7. Galga Extensiometrica



3.2. Descripción de los elementos finales de control

Después que el controlador ha tomado una decisión en base a lo medido con el sensor, la señal de salida del controlador posiciona el elemento final de control para manipular la variable que esta siendo controlada. El diseño del elemento final de control esta determinado por las necesidades del sistema.

Entre algunos tipos comunes de elementos finales de control se pueden mencionar las válvulas de control, bombas de medición, relays, ventiladores, aspas ajustables o dampers, variadores de velocidad, motores, etc.

3.2.1. Motor de inducción

Es una máquina eléctrica que convierte energía eléctrica en energía mecánica de rotación o par. Los motores más conocidos son el universal, el sincrónico y el de jaula de ardilla que es el más utilizado en procesos industriales. Los motores de jaula de ardilla funcionan con corriente alterna, tienen el rotor en forma de jaula de ardilla cuyo núcleo es de hierro laminado, los conductores longitudinales son de cobre y van soldados a las piezas terminales de metal, cada conductor forma una espira en el conductor opuesto conectado por dos piezas circulares en los extremos, cuando el rotor está entre dos polos del campo electromagnético formado en el estator, se induce una fuerza

electromagnética en las espiras y una corriente circula por la espira la cual genera un campo electromagnético en el rotor, dicho campo trata de alinearse con el campo del estator por lo que el motor gira en la dirección del campo del estator.

Figura 8. Motor inductivo de jaula de ardilla



3.2.2. Motores modulantes (Servomotores)

Estos son motores especiales en los cuales se puede controlar la posición angular en que se encuentran o sea que se tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. En la práctica, se usan servos para posicionar

Aspas o dampers superficies de control como el movimiento de Aspas o dampers, movimiento de palancas, apertura de válvulas, etc.

Están compuestos de circuitos de control y un potenciómetro (una resistencia variable) que esta conectada al eje central del servo motor, este potenciómetro permite al control supervisar el ángulo actual del servo motor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito chequea que el ángulo no es el correcto, el motor girará en la dirección adecuada hasta llegar al ángulo correcto. El eje del servo es capaz de llegar alrededor de los 180 grados, la cantidad de voltaje aplicado al motor es proporcional a la distancia que éste necesita viajar.

Figura 9. Motor modulante



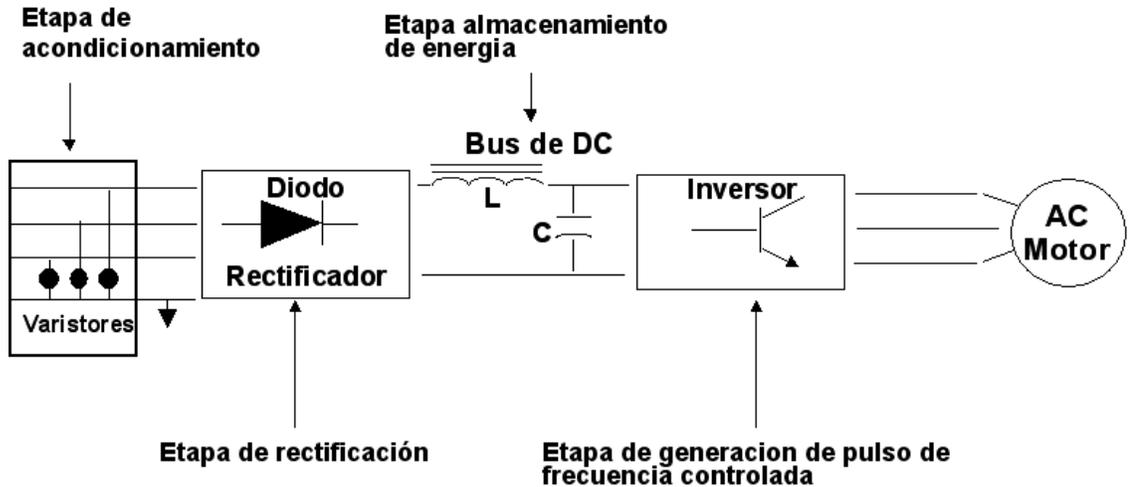
3.2.3. Variador de velocidad

El variador de frecuencia es un dispositivo electrónico que regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Simultáneamente con el cambio de frecuencia, se varia el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el motor.

Los variadores de frecuencia están compuestos por:

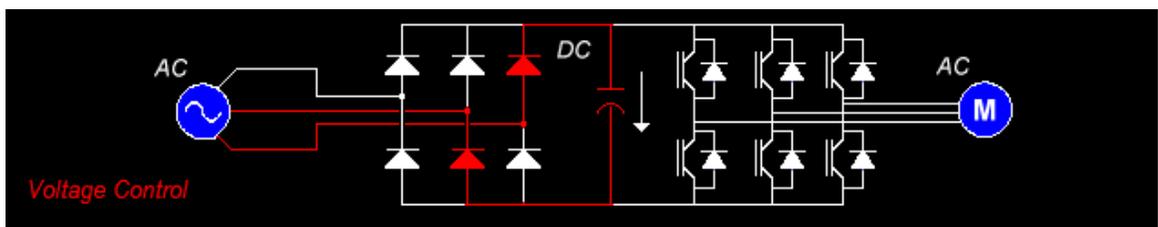
- Etapa Rectificadora. Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.
- Etapa intermedia. Filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.
- Etapa de control. Esta etapa controla los IGBT para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Además controla los parámetros externos en general, etc.

Figura 10. Etapas del variador de velocidad



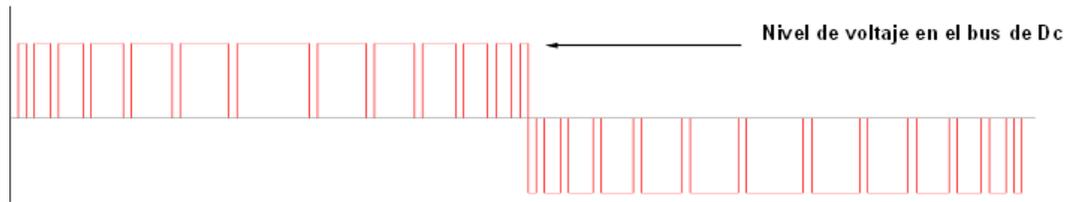
Los variadores mas utilizados utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia. Los fabricantes que utilizan bobinas en la línea en lugar del circuito intermedio, pero tienen la desventaja de ocupar más espacio y disminuir la eficiencia del variador

Figura 11. Etapas del variador de velocidad esquema trifásico



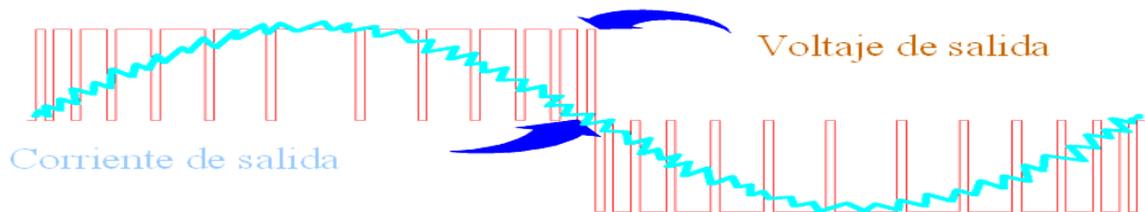
La forma de onda de voltaje resultante de la modulación de ancho de pulso es la siguiente

Figura 12. Gráfico de voltaje PWM



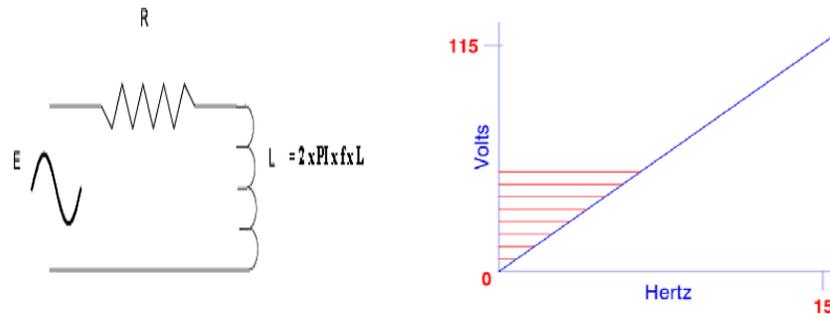
Esta forma de onda tiene un valor de RMS que trata de igualar el área bajo la curva de una onda senoidal partiendo del concepto que si se varia el módulo o ancho de pulso también se varia el valor RMS de la onda, teniendo una forma de onda de corriente muy similar a una senoidal pero distorsionada.

Figura 13. Forma de onda de corriente a raíz de voltaje PWM



El circuito equivalente de una devanado de un motor es una resistencia en serie con una impedancia inductiva ($X_L = 2\pi f L$), en condiciones normales se disipa aproximadamente un 95% de la energía en X_L y un 5% en la resistencia, pero al reducir la frecuencia el valor de X_L disminuirá, por consecuencia se disipara mas energía en la R y esta energía será transformada en calor y no en movimiento rotatorio. Por esta razón se debe de realizar un control del voltaje proporcional a la frecuencia aplicada para que el motor no sufra daños por sobrecalentamiento.

Figura 14. Diagrama equivalente de bobina de un motor y relación Voltios/Hertz



3.2.4. Válvulas

Una válvula se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.

Las válvulas son unos de los instrumentos de control más esenciales en la industria

Las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. En algunas instalaciones se requiere un sellado absoluto; en otras, las fugas o escurrimientos no tienen importancia.

La válvula de control generalmente constituye el último elemento en un lazo de control instalado en la línea de proceso y se comporta como un orificio cuya sección de paso varía continuamente con la finalidad de controlar un caudal en una forma determinada.

Las válvulas de control constan básicamente de dos partes que son: el cuerpo y la parte motriz o actuador.

- Cuerpo de la válvula: este esta provisto de un obturador o tapón, los asientos del mismo y una serie de accesorios
- Actuador: el actuador también llamado accionador o motor, puede ser neumático, eléctrico o hidráulico

3.2.5. Actuadores

Los actuadotes son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de energía eléctrica, movimiento de gases o de líquidos. El actuador recibe la orden de un regulador o controlador y da la salida necesaria para activar a un elemento final de control como las válvulas.

Se pueden encontrar varios tipos de actuadores según la fuerza que los activa, entre los cuales encontramos los eléctricos, los neumáticos y los hidráulicos.

3.2.5.1. Actuadores eléctricos

La estructura de un actuador eléctrico es simple en comparación con la de los actuadores hidráulicos y neumáticos, ya que sólo se requieren de energía eléctrica como fuente de poder. Como se utilizan cables eléctricos para transmitir electricidad y las señales, es altamente versátil y prácticamente no hay restricciones respecto a la distancia entra la fuente de poder y el actuador.

La forma más sencilla para el accionamiento con un pistón, seria la instalación de una palanca solidaria a una bisagra adherida a una superficie paralela al eje del pistón de accionamiento y a las entradas roscadas. El pistón eléctrico puede ser accionado por una corriente, con lo cual para su accionamiento, solo hará falta utilizar un simple relé. En caso que se decidiera alimentarlo con corriente continua, la corriente deberá ser del mismo valor pudiendo ser activado por una salida a transistor de un PLC.

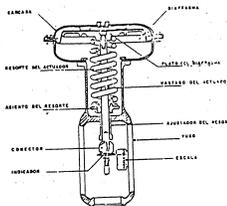
Figura 15. Actuador eléctrico



3.2.5.2. Actuadores neumáticos

A los mecanismos que convierten la energía del aire comprimido en trabajo mecánico se les denomina actuadores neumáticos. Aunque en esencia son idénticos a los actuadores hidráulicos, el rango de compresión es mayor en este caso, además de que hay una pequeña diferencia en cuanto al uso y en lo que se refiere a la estructura, debido a que estos tienen poca viscosidad.

Figura 16. Actuador neumático



3.2.5.3. Actuadores hidráulicos

Los actuadores hidráulicos, que son los de mayor antigüedad, pueden ser clasificados de acuerdo con la forma de operación, funcionan en base a fluidos a presión. Existen tres grandes grupos, el cilindro hidráulico que por su función podemos clasificar a los cilindros hidráulicos en dos tipos: de Efecto simple y de acción doble.

El control de dirección se lleva a cabo mediante una solenoide eléctrica que en el interior poseen un resorte que cambia su constante elástica con el paso de la corriente. Es decir, si circula corriente por el pistón eléctrico este puede ser extendido fácilmente.

También se cuenta entre estos el motor hidráulico que tiene un movimiento rotatorio que es generado por la presión. El aceite a presión fluye desde la entrada que actúa sobre la cara dentada de cada engranaje generando torque en la dirección de la flecha.

3.3. Modos de control

Los modos de control usados en producción son de diversos tipos según lo requiera el proceso mismo puesto que algunos procesos requieren un control muy pequeño con el que pueden operar satisfactoriamente con un amplio rango de tolerancia y otros pueden requerir de un método de control más complejo. Un proceso específico determina el tipo de control requerido, el componente en el lazo que provee un control automático es el controlador.

Existen varios tipos de control de procesos, el control de dos posiciones *on-off* y el control continuo entre los que podemos mencionar el control proporcional, el control integral y el control derivativo o una combinación de estos, los cuales posicionan el elemento final de control en cualquier punto de su rango.

3.3.1. Control *on-off*

El modo de control de dos posiciones *on-off* es el más simple puesto que es básicamente de encendido-apagado del elemento final de control el cual tiene únicamente dos posiciones, abierto y cerrado y es utilizado en sistemas que no requieran un control preciso.

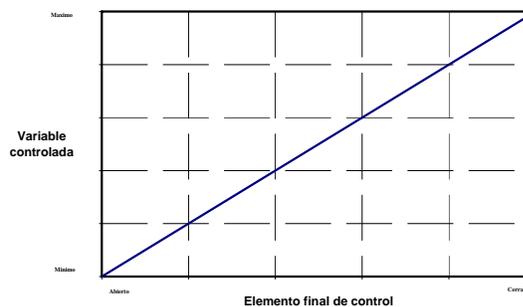
3.3.2. Control PID (proporcional, integral y derivativo)

Este tipo de modo de control es frecuentemente usado en procesos en donde el valor de la variable controlada es constantemente cambiado en respuesta a *upsets*.

Las dinámicas de proceso prohíben el uso de un modo de control de dos posiciones *on-off*. Puesto que en este caso el modo de control on-off no puede mantener el proceso en los límites tolerables.

Los controladores proporcionales son designados a mantener una relación continua entre la variable controlada y la posición del elemento final de control, la cual depende de la respuesta que se requiera a un cambio de la variable controlada, dicha relación puede ser descrita gráficamente.

Figura 17. Gráfico Variable controlada Vrs. Elemento final de control



El término proporcional de banda designa la cantidad de entrada de cambio necesaria para proveer una proporción completa de salida de cambio, en la mayoría de casos la cantidad de acción de control proporcional es ajustable.

Este ajuste se refiere al cambio del ancho o porcentaje, de la banda proporcional. La banda proporcional usualmente es referida en porcentaje y puede ser calculada por la siguiente ecuación

$$PB = \frac{1}{\text{Aumento}} * 100$$

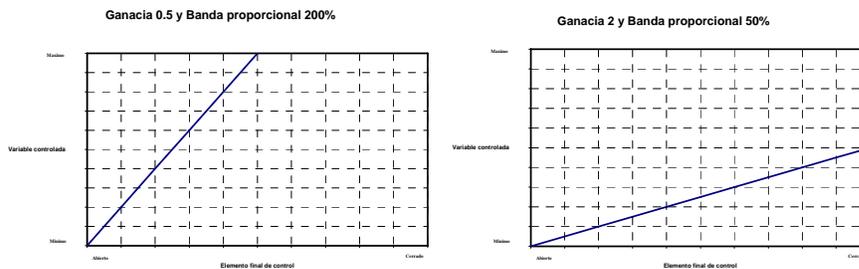
Tabla III. Comparativo Incremento proporcional, banda proporcional

Incremento proporcional	Ganancia proporcional	Pb= banda proporcional
2	2	50%
1	1	100%
0.5	0.5	200%

Una banda proporcional ancha o aumento bajo corresponde a una menor sensibilidad de respuesta. Una banda proporcional angosta o aumento alto corresponde a una mayor sensibilidad de respuesta.

Es importante percatarse de que la banda proporcional y el aumento están inversamente relacionadas, si la banda proporcional aumenta, el incremento disminuye como se aprecia en los siguientes gráficos.

Figura 18. Gráficos comparativos ganancia 0.5 y ganancia 2



Para determinar el valor de banda proporcional óptima para un proceso es frecuentemente un proceso de prueba y error basado en una observación cuidadosa sobre el tiempo, record de gráficos, etc. Los factores que determinan la banda proporcional óptima incluyen la naturaleza y frecuencia de *upsets* al sistema y control de características del proceso.

La acción de control proporcional provee control continuo al **responder directamente a la magnitud del error o desviación** y produce correcciones proporcionales a desviaciones, por lo tanto después de cualquier *upset* alguna

desviación permanecerá, la desviación necesaria o prolongada asociada con el control proporcional se denomina *offset*.

Los controladores proporcionales usualmente tienen un segundo control de acción designado para eliminar el *offset* con las mismas secuencias de pasos, revisión, ajuste y revisión del estatus de la variable controlada hasta que el proceso regrese al *set-point*. Por lo que se puede decir que esta acción integra, término que es aplicado a este modelo de control y **responde a la duración del error**.

La acción integral puede ser referida a la acción de *reset* nombre con el cual se conoce también puesto que esta restablece la salida del controlador sobre el tiempo hasta que el *set-point* es alcanzado. Dicha acción esta determinada en “repeticiones por minuto” o “minutos por repeticiones”.

El control integral continúa proveyendo acción de control adicional tan grande como el *offset* se encuentre presente y regresara la variable del proceso al *set-point* tan rápido como sea posible sin crear oscilación significativa en el sistema.

La acción integral puede ser ajustada en la misma forma que la acción proporcional. Esta acción no puede ser usada para estabilizar un proceso, la estabilización es alcanzada a través de la acción proporcional y la acción integral esta diseñada para eliminar el *offset*.

Cuando el control proporcional es combinado con el control integral, la acción proporcional es repetida hasta que el elemento de control final es posicionado al *offset* correcto. El control proporcional más la integral se refiere a un control PI.

En procesos que tienen respuesta lenta se agrega a la acción proporcional e integral la acción derivativa, que responde tan rápidamente como un proceso es desviado del *set-point*. El control proporcional más el integral

más el derivativo es denominado control PID que es el más complejo de los modos de control.

El control PID responde rápidamente a *upset* en el proceso por lo que existe menos tiempo de retraso. El término retraso es usado en este caso para referirse al tiempo que depende de los procesos naturales o al comportamiento de los componentes en el proceso del lazo de control. Cuando el proceso o componentes del mismo son lentos para responder, la salida se retrasará detrás de cualquier entrada, la acción derivativa compensará estos retrasos y reducirá las oscilaciones y recortes.

Para conectar controladores PID, es necesario realizar los tres ajustes a los valores individuales.

La acción derivativa capacita al controlador a responder más rápidamente y posiciona el elemento final de control más rápidamente que lo que harían las acciones proporcionales o integrales, lo que da como resultado menos recortes y oscilaciones.

El control derivativo proporciona una respuesta directa a la velocidad del error o desviación proveída al sistema.

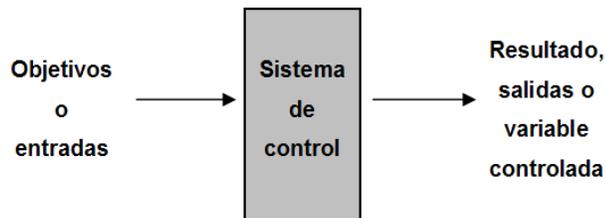
La acción integral responde a la duración del error

La acción proporcional, integral y derivativa trabajan juntas para proveer un medio eficiente y exacto de control automático

4. SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control tiene la característica de obtener resultados en base a un objetivo establecido obteniéndose una solución a un problema en particular. Los procesos pueden ser controlados manualmente o automáticamente, las funciones de control manual son logradas en forma individual, mientras que las funciones de control automático son logradas por instrumentos. Un sistema de control esta compuesto básicamente por los objetivos o entradas del proceso, los componentes y el resultado, salida o variable controlada del proceso, relacionadas de la siguiente forma:

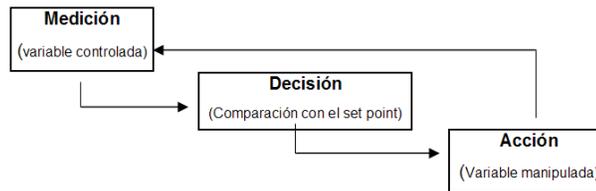
Figura 19. Componentes de un sistema de control



Fuente: Kuo. “Sistemas de control automático”, séptima edición, Pág. 3

Los procesos industriales son típicamente más complejos. Ellos usualmente contienen numerosas variables y cada variable es monitoreada por uno o más instrumentos. El control automático reúne información para tomar una decisión para mantener en control la variable manipulada, puesto que se diseña para mantener estas bajo control. El control de procesos industriales empieza con la medición de una variable, esta información es usada para decidir acerca del proceso y finalmente se toma la acción basada en esta decisión, tal como se ilustra a continuación.

Figura 20. Pasos del control de procesos



El término usado para designar la variable que debe ser controlada es variable controlada, cualquier variable que es medida se llama variable de medida.

Frecuentemente la variable medida y la variable controlada es la misma variable, sin embargo en algunos casos, el valor de la variable controlada no puede ser medida directamente, en este caso la variable medida no identifica la variable controlada pero esta directamente relacionada con ella.

Una vez el valor actual de la variable controlada es conocido, este es comparado con el valor deseado o *set point*, la diferencia que existe entre estos valores se llama desviación.

El valor de la desviación es tomado para modificar la variable controlada y llevarla a valores de *set point*. Por lo que se puede decir que un sistema de control de un proceso es diseñado para mantener la variable controlada en el *set point*. Varios factores determinan la velocidad con que el sistema de control responde, uno de los factores mas importantes es el tiempo de respuesta del sensor a utilizar puesto que los sensores no responden de una forma inmediata a un cambio en la variable, un periodo de tiempo es necesario para que el sensor responda a algún cambio. El término “tiempo de respuesta” es usado para definir el tiempo que un instrumento necesita para responder a un cambio en la variable medida. El tiempo de respuesta depende del tipo de sensor, la posición en que es colocado, etc.

4.1. Tipos de sistemas de control

Existen varios criterios para clasificar los sistemas de control, los cuales están definidos por la tecnología en sistemas mecánicos, neumáticos, hidráulicos, eléctricos, electrónicos, por la verificación del estado de la salida del proceso en sistemas de lazo cerrado o de lazo abierto, por el tipo de señal que utilizan en analógicos y digitales, y por el tipo de relación entre los elementos del sistema en cableados y programados.

4.1.1. Por su tecnología de control

En esta clasificación se toma en cuenta la aplicación en ingeniería mecánica, neumática, hidráulica, eléctrica y electrónica, así como también, existen combinaciones de estas que son las mas útiles ya que comprenden una parte importante en los sistemas de control.

4.1.1.1. Control mecánico

Este tipo de control esta compuesto por partes de hardware como ruedas dentadas, poleas de transmisión de movimiento, engranajes, levas, palancas de control de recorridos, mecanismos de conversión de movimiento circular a rectilíneo y viceversa, etc.

4.1.1.2. Control neumático

En este tipo de control no se requiere de exactitud en el proceso ni tampoco gran velocidad, estos son utilizados en trabajos de fijación de piezas, bloqueo de órganos, alimentación de maquinas y movimiento lineal de órganos que no requieran velocidades de actuación rigurosamente constantes.

4.1.1.3. Control hidráulico

Este tipo de control al igual que el neumático se utiliza en procesos en los que no se requiera rigurosamente exactitud y que no requieran de

demasiada velocidad de respuesta pero desarrollan mayor fuerza para realizar trabajo.

4.1.1.4. Control eléctrico

Básicamente todos los sistemas de control involucran la automatización eléctrica. Es importante que una máquina tenga un sistema eléctrico con un mando de control para habilitar sus funciones, son utilizadas para obtener un control de movimiento lineal o angular, control de velocidad, control de apertura de válvulas, activación de motores, etc.

4.1.1.5. Control electrónico

La evolución de la electrónica digital y el avance del microprocesador, el control electrónico se ha convertido en una de las partes importantes de la automatización, el microprocesador es la parte principal de los ordenadores y de los autómatas programables con los que se ha podido realizar diversos sistemas de control que involucran el manejo de datos mediante la interacción de sistemas muy complejos.

También se pudo desarrollar una serie de tareas en las cuales existen procesos automáticos mediante registros internos que interactúan entre la interfase y el operador, entre el protocolo de comunicación y aplicaciones de transferencia y recopilación de archivos y otras aplicaciones de informática

4.1.2. Por la verificación del estado de la salida

En esta clasificación se toma en cuenta la relación del control respecto a la variable salida, esta compuesta por sistemas de lazo cerrado y de lazo abierto.

4.1.2.1. Lazo cerrado

En este tipo de control la acción de control depende de la salida a este de control también se le conoce como control retroalimentado. La

retroalimentación en el sistema de control consiste en comparar constantemente la magnitud de la variable controlada del proceso o de la salida, en el caso que los dos valores sean iguales no habrá ninguna variación sobre la magnitud de la variable de salida.

Casi sin excepción los sistemas de control actuales están basados en el principio de control de retroalimentación, la función de este es mantener la variable controlada tan cerca del *set point* como sea práctico.

4.1.2.2. Lazo abierto

En este tipo de sistema la acción de control es independiente de la salida, o sea que la salida no tiene influencia sobre la señal de entrada. En otras palabras no existe una variable de control que regule la salida a un valor deseado.

Solo existe salida predefinida de acuerdo a su entrada.

4.1.3. Por el tipo de señal

En esta clasificación toma en cuenta el tipo de señal que se procesa para realizar el control, el tipo de señal obtenida de los sensores, y el manejo de esta información.

4.1.3.1. Analógicos

Este tipo de control comprende señales de formas de onda en función de una variable independiente que usualmente es el tiempo, esta depende de una serie de valores continuos de la variable independiente. Cuando cambia el valor necesariamente ha de tomar todos los valores intermedios entre los límites. Entre este tipo de señales tenemos las señales estándares de proceso que son de 0 a 10 voltios, 4 a 20 ma y 3 a 10 psi, todas denotan una posición de 0% a 100% en el proceso.

4.1.3.2. Digitales

Este tipo de control comprende señales que se analizan y se aplican en instantes discretos de la variable independiente, estas señales discretas en el tiempo son valores muestreados de una señal continua en el tiempo.

4.1.4. Por la relación entre los elementos

En esta clasificación toma en cuenta las tecnologías empleadas en la automatización, estos se dividen en cableados y programados

4.1.4.1. Cableados

Este tipo de sistema tiene la particularidad de interactuar entre los componentes físicos de un sistema mediante uniones físicas de cable. La forma de establecer estas uniones se determina por un análisis de estudio teórico o por medio de un criterio profesional. Esta tecnología ha adquirido una gran importancia en aplicaciones industriales puesto que se pueden unificar la mecánica, neumática, hidráulica y eléctrica.

4.1.4.2. Programados

Este tipo de sistema comprende tecnología basada en microprocesadores, donde se utilizan sistemas de control interno mediante la implementación de registros, memorias, puertos de entrada y salida, periféricos, etc. Tienen un lenguaje de programación de fácil manejo para los diseñadores que utilizan estos sistemas, involucran también dispositivos con relevadores.

4.2. Control Lógico Programable (PLC)

Los controladores lógicos programables o PLC (*Program logic controller*), son equipos electrónicos los cuales cuentan en su interior con una minicomputadora con procesador, este es programable en lenguaje no informático, esta diseñado para controlar en tiempo real los procesos de la industria actual. Fueron desarrollados para reemplazar a los circuitos de

4.2.2. Salidas

Es la interfase que utiliza el procesador para ejecutar los resultados del análisis de la información, las señales emitidas por estos módulos puede ser analógica o digital al igual que los módulos de entrada, entre los dispositivos que pueden ser conectados a estos módulos tenemos los motores moduladores, las válvulas proporcionales, los reles, selenoides, contactores, arrancadores, alarmas, luces indicadoras, etc.

4.2.3. Unidad central de procesamiento (CPU)

Es la parte principal del PLC y puede ser considerada como el cerebro de todo el sistema consta de un microprocesador, un sistema de memoria y una fuente de alimentación, esta unidad toma la información adquirida por los sensores a través de los módulos de entrada, la analiza en base al programa lógico almacenado en su memoria, ejecuta los cálculos necesarios y emite una señal por medio de los módulos de salida. La memoria de la unidad de procesamiento se encuentra dividida en el área de programa que es donde se almacena el programa que el programador ha realizado, el área interna que esta dedicada a los recursos del autómatas como los registros de entrada, salida, valores preseleccionados, valores acumulativos como los temporizadores y contadores, por último tenemos el área de datos que es el área dedicada a la memoria de datos, registros permanentes y variables utilizadas para la elaboración del programa.

4.2.4. Dispositivos de programación

Son dispositivos por medio de los cuales se puede introducir un programa lógico a un PLC, regularmente se cuenta con un programa informático instalado en una PC (computadora personal) o un programador de mano. Los programas informáticos permiten al usuario crear, editar,

documentar, almacenar programas que pueden ser ejecutados por el PLC para realizar tareas particularmente definidas o para localizar y corregir problemas.

4.2.5. Interfase

Estos elementos sirven de comunicación entre el hombre y la máquina, su función es proporcionar datos y mostrar mensajes sobre el estado de los componentes que están interviniendo en el proceso. Estas pueden estar conectadas a los PLC por medio de puertos de comunicación establecidos como el serial y el paralelo o algún otro puerto disponible.

Dentro de las **ventajas** que ofrece el uso de los PLC son entre otras la confiabilidad del sistema por su gran velocidad y exactitud en la ejecución de los procesos, la flexibilidad de hacer cambios al programa sin hacer modificaciones de aparatos ni cableados, no es necesario simplificar operaciones lógicas, si por alguna razón el programa de ejecución se pierde puede ser fácilmente descargado de nuevo para seguir operando, posee funciones avanzadas para ejecutar una amplia variedad de tareas de control como el PID, permite obtener información del proceso en tiempo real por medio de las interfaces de comunicación y una gran versatilidad en la localización y corrección de problemas en los dispositivos cuando existe una falla en los mismos.

Dentro de las **desventajas** podríamos mencionar que la inversión inicial de la implementación de un control de proceso con PLC puede ser alta y que se necesita de un programador y operadores capacitados para la manipulación de estos procesos.

4.3. Ciclo de operaciones

El ciclo de operaciones de un controlador consiste en una serie de operaciones ejecutadas secuencialmente en forma cíclica durante todo el tiempo de ejecución del programa.

Un ciclo de operación esta compuesto por:

- **Escán de entrada**

Es el tiempo que le toma al controlador escanear y leer todos los datos de entrada, si estos tienen o no presencia de voltaje, etc. esta información es almacenada temporalmente en un archivo de memoria de entradas.

- **Escán del programa**

Es el tiempo que le toma al procesador ejecutar las instrucciones en el programa lógico almacenado en el, tomando en cuenta la información almacenada en el archivo temporal de entradas y determina si el estado de una salida debe ser modificado o no, esta información debe ser almacenada en un archivo temporal de memoria de salidas, este tiempo varia dependiendo de la cantidad y tipo de instrucciones utilizadas además del estado de cada instrucción durante el tiempo del escán.

- **Escán de salida**

Es el tiempo que le toma al controlador escanear y escribir todos los datos de las salidas, controlando así los elementos finales de control.

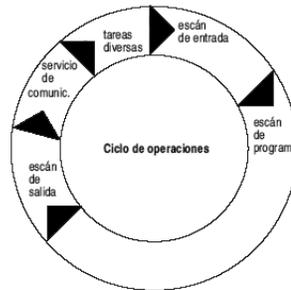
- **Servicio de comunicaciones**

Es el tiempo utilizado para realizar la comunicación con otros dispositivos, por ejemplo comunicación con la computadora personal (PC).

- **Mantenimiento interno y tareas diversas**

Es el tiempo dedicado a la administración de la memoria y actualización de temporizadores, contadores y registros internos.

Figura 23. Ciclo de exploración del programa



Fuente: "Instalación y operación de SLC 500", Publicación 1747-6.2ES-1996

El tiempo total de todo el ciclo de operaciones se le denomina tiempo de exploración.

4.4. Lenguajes de programación para un autómata

Cuando se habla de un lenguaje de programación se refiere a las diferentes formas de poder escribir un programa por el usuario, el desarrollo de los controladores lógicos programables trajo consigo la necesidad de tener lenguajes de programación compatibles con los criterios de ese tiempo por lo que las primeras estructuras de programación se asemejaban a los grandes paneles con muchos relevadores en escalera (lenguaje de escalera), esta fue una buena elección ya que facilita el entrenamiento de los programadores ya que estos conocían estos diagramas. En estos sistemas de lógica combinacional, el estado de una salida queda determinado por el estado de una cierta combinación de entradas sin importar la historia de éstas, otro lenguaje utilizado es el booleano (lenguaje de bloques de funciones) que se basa en los mismos principios de algebra booleana, utiliza nemónicos (and, or, nand, nor,

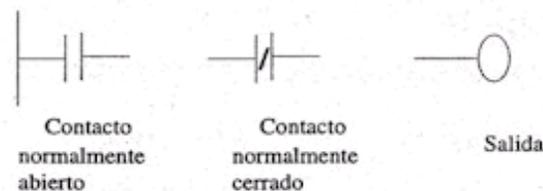
xor, etc.) que son equivalentes a los lenguajes de escalera. En general la lógica de programación de un PLC utiliza elementos lógicos para realizar funciones como en la electrónica digital además de instrucciones de temporizadores, contadores, registros de corrimiento, banderas, etc.

4.4.1. Lenguaje de contactos o KOP

Es uno de los primeros lenguajes diseñados para la programación de autómatas, este se asemeja a los paneles con conexiones eléctricas con relevadores, este tipo de programación es muy sencillo ya que los electricistas tienen un amplio conocimiento de ellos por los diagramas que manejan en conexiones de control, mando, protección, etc. Este lenguaje es básicamente gráfico, derivado del lenguaje de relés y mediante símbolos representa contactos, solenoides, etc.

Sus símbolos básicos están normalizados según normas NEMA y son el contacto normalmente abierto, el contacto normalmente cerrado y la salida.

Figura 24. Símbolos básicos de representación en lenguaje KOP

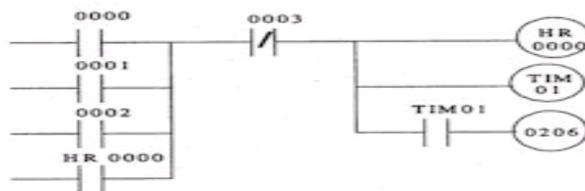


Para las líneas de función más complejas como temporizadores, registros de desplazamiento, etc, se emplea el formato de bloques. Estos no están formalizados, aunque guardan una gran similitud entre sí para distintos fabricantes y resultan mucho más expresivos que si se utiliza para el mismo fin el lenguaje en lista de instrucciones o nemónico.

Un programa en esquema de contactos, la constituyen una serie de ramas de contactos que corresponden a estados del sistema o condiciones de ejecución.

Las combinaciones lógicas forman ramas compuestas de una serie de contactos conectados en serie o en paralelo que dan origen a una salida que bien puede ser una bobina o una función especial, todos los contactos llevan asignada una dirección de bit para identificar cada uno de ellos, el flujo de la señal va de izquierda a derecha y el número de contactos o bobinas en serie o en paralelo es prácticamente ilimitado. Los esquemas de contactos siempre deben acabar con la instrucción "END".

Figura 25. Diagrama eléctrico de escalera



La mayoría de autómatas pueden ser programados mediante este lenguaje, este es utilizado en operaciones basadas en bits, operaciones lógicas complejas, enclavamiento de maquinas, aplicaciones de servo sistemas, ejecución paralela y continua de múltiples operaciones o secuencias. Este tipo de programación facilita el aprendizaje para el desarrollo de controles avanzados y prácticos.

Este tipo de lenguaje utiliza un marco de programación que obliga al operador a centrarse en cada salida de una forma individual.

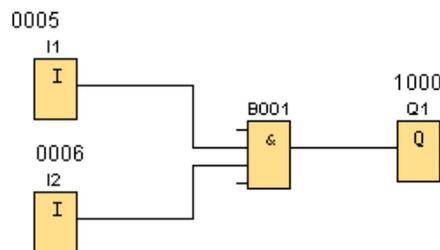
4.4.2. Lenguaje de bloques de funciones o (FUP)

Este tipo de lenguaje consiste en un conjunto de códigos simbólicos, cada uno de los cuales corresponde a una instrucción, se basa en los mismos principios del algebra booleana y utiliza nemónicos tales como And, Or, Nand, Nor, Xor, etc., tiene la finalidad de trabajar con problemas en los cuales se utilizan estas funciones lógicas. El desarrollo de un programa con funciones

lógicas puede lograr resultados de bloque construcción, los cuales pueden realizar diferentes problemas de sistemas de control como los contadores descendentes, contadores ascendentes, multiplexores, decodificadores, slip-flops, etc. y construir circuitos digitales muy complejos a partir de funciones sencillas, este lenguaje facilita el diseño digital por medio del PLC por medio de instrucciones ya establecidas además de facilitar la transferencia de datos de un archivo a otro o de un registro a otro, realizar programación con comparadores, etc.. El lenguaje en mnemónico es similar al lenguaje ensamblador del micro.

Este lenguaje es utilizado en el control de procesos continuos y control de variadores de velocidad, en la generación de lazos de control y en cálculos de circuito de flujo.

Figura 26. Diagrama de Bloques



4.4.3. Lenguaje de instrucciones (AWL)

Es uno de los lenguajes más utilizados en la actualidad debido a la capacidad de comprensión lógica de las instrucciones que posee, cada lenguaje tiene sus propias instrucciones y cada una realiza una función diferente que conjuntamente llegan a generar el control de alguna función, manipulación de gráficos animados. Puede ejecutar operaciones aritméticas, subrutinas, ciclos, temporizadores, saltos, trabajar con los registros internos de memoria y a la vez realizar tareas programadas y no programadas. Una lista de instrucciones esta compuesta de la instrucción que especifica la operación a realizar, el parámetro que son los datos asociados a la operación (instrucción) y la dirección que

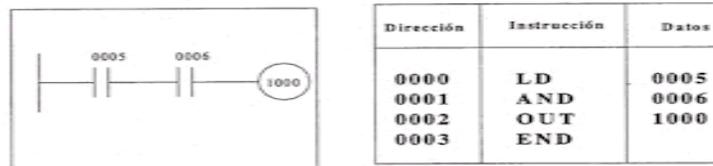
indica la posición de la instrucción en la memoria de programa del usuario.

Las funciones de control vienen representadas por expresiones abreviadas, la fase de programación es más rápida que el lenguaje de esquema de contactos.

Figura 27. Instrucción de lenguaje AWL

Dirección	Instrucción	Parámetro
0000	LD	H0501

Figura 28. Comparativo diagrama de escalera y lenguaje de instrucciones



Este lenguaje es utilizado en operaciones matemáticas complejas, arreglos especializados o tabla de proceso de lazos y en manejo de datos alfanuméricos ASCII o protocolo de procesamiento.

4.5. Pasos para el diseño e implementación de un control automático

A continuación se describirán algunos pasos a tomar en cuenta para el desarrollo de un sistema automático de control de un proceso en general.

El primer paso consiste en determinar las necesidades que se tienen en el proceso de producción tomando como base la experiencia de las personas que están más familiarizadas con el proceso, realizar un análisis profundo del proceso en forma manual y con esto determinar los pasos que llevara el control automatizado, también se debe de conocer el modo de funcionamiento de los sensores y actuadores que se van a utilizar, se define también el tipo y la

cantidad de entradas a utilizar en la generación del control, de la misma forma se definen las salidas.

Como segundo paso se debe de establecer las condiciones generales para el desarrollo del programa, para ello se realiza un listado de direcciones de la siguiente forma, en la primera columna se coloca la denominación exacta de las entradas y salidas, en la segunda se coloca la abreviatura o dirección simbólica, en la tercera columna se colocan las direcciones del PLC a colocar y en la cuarta columna se coloca el significado de las señales en cada una de las entradas y salidas.

Como tercer paso se procede a la generación de un programa lógico llamado también algoritmo. Este algoritmo esta compuesto por un conjunto de instrucciones lógicas con un número definido de pasos que darán como resultado un control automático efectivo. Si el resultado del algoritmo no es el esperado, se debe de regresar a la primera etapa para definir las correcciones que el sistema requiera. El programa generado debe de tener un desarrollo sistemático y ordenado para reducir la probabilidad de error y facilitar las correcciones que sean necesarias.

Para obtener un buen resultado es básica la organización de todas las tareas, por lo que una buena práctica es el desarrollo de un diagrama de flujo del sistema a automatizar en donde se puede analizar y definir la secuencia del sistema de control.

Por último, después de generar el programa de control se debe de trasladar al PLC, pero antes se debe configurar en el procesador todos los módulos a utilizar tales como, la fuente de alimentación, el tipo de procesador, el tipo y ubicación de los módulos de entrada, el tipo y ubicación de los módulos de salida, etc., tomando en cuenta el orden de los mismos para la asignación de las direcciones, una forma sería agrupar todos los módulos de iguales características como módulos discretos o analógicos, si son alimentados por AC o DC, además de considerar el dejar espacios libres para futuras expansiones.

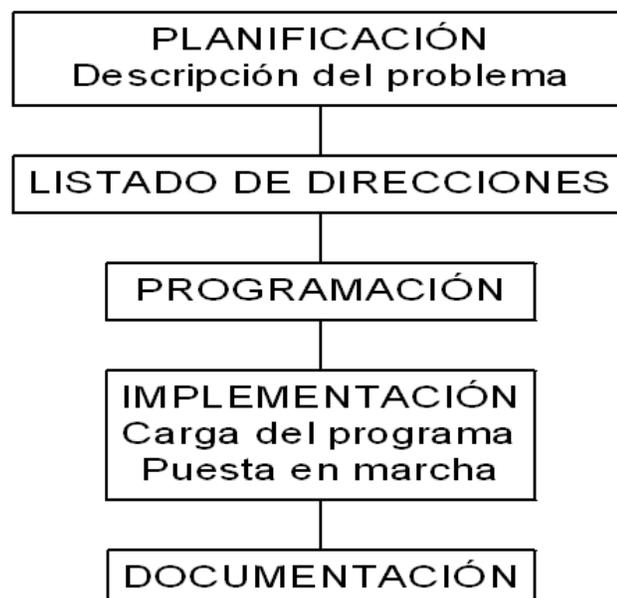
Ya tomadas estas consideraciones se procede a la asignación de las direcciones que es uno de los pasos más importantes de la implementación del programa de control. También deben configurarse los registros internos que incluyen temporizadores, contadores, etc..

Una vez asignadas las direcciones de las entradas y salidas, se debe realizar una tabla para asignar los dispositivos que serán conectados a los bornes de cada módulo.

Después de esto se puede descargar a la memoria del procesador el programa de control y realizar las pruebas respectivas.

Después de implementado el sistema se debe de documentar todo el proceso, este paso facilitara los cambios al sistema, el mantenimiento y la solución de fallas. La documentación debe de contener información de la operación del proceso, los componentes de hardware y software del sistema de control, una copia electrónica del programa, etc., esta documentación debe de ser actualizada cada vez que se realice un cambio al sistema.

Figura 29. Diagrama de flujo para la implementación de un control automático



4.6. Criterios para la selección del procesador

La selección del procesador es de mucha importancia puesto esto garantizara que el controlador podrá realizar todas actividades que se requieren para lograr un buen control sobre los procesos. Los criterios a tomar en cuenta están el soporte de instrucciones que manejan, el tamaño de memoria requerido, la cantidad de entradas y salidas que maneja, los canales de comunicación que se utilizaran. A continuación se muestran tablas con características de procesadores para SLC500.

Tabla IV. Características de procesadores para SLC500

Soporte de instrucción	SLC 5/01 (1747-L511)	SLC 5/01 (1747-L514)	SLC 5/02 (1747-L524)	SLC 5/03 (1747-L532)	SLC 5/04 (1747-L541)	SLC 5/04 (1747-L542)	SLC 5/04 (1747-L543)
Bit	*	*	*	*	*	*	*
Temporizador y contador	*	*	*	*	*	*	*
Comparación	*	*	*	*	*	*	*
Matemática básica	*	*	*	*	*	*	*
Mover, copiar y desplazamiento de bit	*	*	*	*	*	*	*
Secuenciador	*	*	*	*	*	*	*
Salto y subrutina	*	*	*	*	*	*	*
Mensajes			*	*	*	*	*
STI			*	*	*	*	*
FIFO/LIFO			*	*	*	*	*
PID			*	*	*	*	*
Matemática y trigonometría avanzada				*	*	*	*
Direccionalidad indirecta				*	*	*	*
Matemáticas de punto (coma) flotante				*	*	*	*

Fuente: "Instalación y operación de SLC 500", Publicación 1747-6.2ES-1996

Tabla V. Especificaciones de procesadores para SLC500

Especificación	SLC 501 (1747-L511)	SLC 501 (1747-L514)	SLC 502 (1747-L524)	SLC 503 (1747-L532)	SLC 504 (1747-L541)	SLC 504 (1747-L542)	SLC 504 (1747-L543)
Memoria del programa	1 K instrucciones de usuario o 4 K palabras de datos	4 K instrucciones de usuario o 16 K palabras de datos	4 K instrucciones de usuario o 16 K palabras de datos	12 K instrucciones de usuario y 4 K de palabras de datos adicionales	12K instrucciones de usuario y 4K de palabras adicionales de datos	28 K instrucciones de usuario y 4K palabras de datos adicionales	60K instrucciones de usuario y 4K palabras de datos adicionales
Capacidad de E/S locales	256 discretas	256 discretas	480 discretas	960 discretas	960 discretas	960 discretas	960 discretas
Capacidad de E/S remotas	No aplicable	No aplicable	El procesador de la memoria y la alm. eléct. del chasis tienen un límite de 4000 entradas y 4000 salidas	El procesador de la memoria y la alm. eléct. del chasis tienen un límite de 4000 entradas y 4000 salidas	El procesador de la memoria y la alm. eléct. del chasis tienen un límite de 4000 entradas y 4000 salidas	El procesador de la memoria y la alm. eléct. del chasis tienen un límite de 4000 entradas y 4000 salidas	El procesador de la memoria y la alm. eléct. del chasis tienen un límite de 4000 entradas y 4000 salidas
Chasis/senas máximas	3/30	3/30	3/30	3/30	3/30	3/30	3/30
RAM estándar	Capacitor 2 semanas ¹ Batería de litio opcional - 5 años	Batería de litio de 2 años	Batería de litio de 2 años	Batería de litio de 2 años	Batería de litio de 2 años	Batería de litio de 2 años	Batería de litio de 2 años
Opciones de respaldo de memoria	EEPROM o UVPPROM	EEPROM o UVPPROM	EEPROM o UVPPROM	EPROM Flash	EPROM Flash	EPROM Flash	EPROM Flash
Indicadores LED	Marcha, fallo CPU, forzado de E/S, batería baja	Marcha, fallo CPU, forzado de E/S, batería baja	Marcha, fallo CPU, forzado de E/S, batería baja, COM	Marcha, fallo CPU, forzado de E/S, batería baja, RS-232, DH-485	Marcha, fallo CPU, forzado de E/S, batería baja, RS-232, DH+	Marcha, fallo CPU, forzado de E/S, batería baja, RS-232, DH+	Marcha, fallo CPU, forzado de E/S, batería baja, RS-232, DH+
Tiempo de reacción típico ²	8 ms/K	8 ms/K	4.8 ms/K	1 ms/K	0.9 ms/K	0.9 ms/K	0.9 ms/K
Ejecución de bits (PIC)	4 µs	4 µs	2.4 µs	.44 µs	.37 µs	.37 µs	.37 µs
Comunicación	DH485 recepción	DH485 recepción	DH485 recepción o inicio	Canal 1: DH485 (DH485 recepción o inicio) Canal 0: RS-232 (DF1, ASCII, o DH485)	Canal 1: DH+ (DH+) Canal 0: RS-232 (DF1, ASCII, o DH485)	Canal 1: DH+ (DH+) Canal 0: RS-232 (DF1, ASCII, o DH485)	Canal 1: DH+ (DH+) Canal 0: RS-232 (DF1, ASCII, o DH485)
Carga de fuente de alimentación a 5VCC	300 mA	350 mA	350 mA	500 mA	1A	1A	1A
Carga de fuente de alimentación a 24VCC	105 mA	105 mA	105 mA	175 mA	200 mA	200 mA	200 mA

Fuente: “Instalación y operación de SLC 500”, Publicación 1747-6.2ES-1996

4.7. Control automático a utilizar

4.7.1. Hardware

4.7.1.1. Tipo de procesador

Se utilizara un procesador Allen Bradley 1747-L541C 5/04 como unidad de procesamiento central. En un rack de 13 slot.

Figura 30. Configuración de procesador en el Programa Logic500

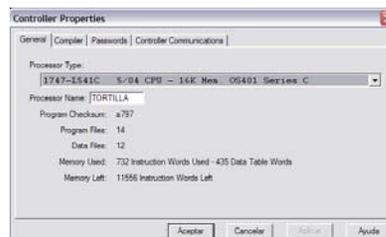
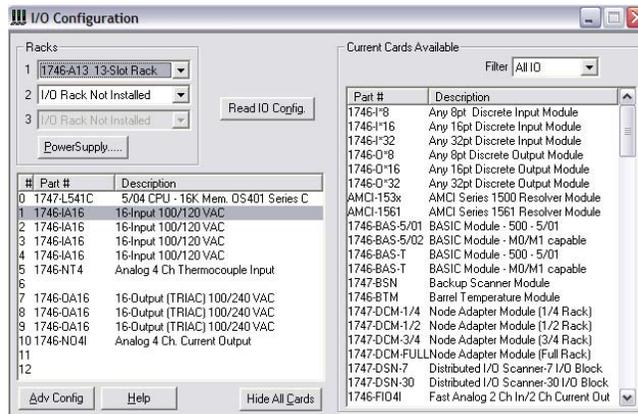


Figura 31. Configuración de Rack en el Programa Logic500



4.7.1.2. Tipo de entradas a utilizar

Se utilizaran cuatro módulos de entradas discretas 1746-IA16 este código corresponde a un módulo de 16 entradas digitales de 100 a 120 Volts de Ac

Figura 32. Configuración entradas discretas en el Programa Logic500

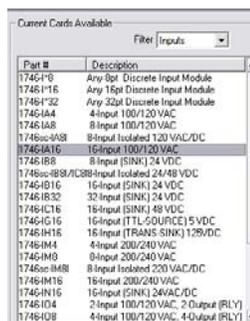
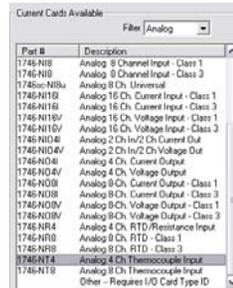


Figura 33. Configuración entradas analógicas en el Programa Logic500



4.7.1.3. Tipo de salidas a utilizar

Se utilizaran tres módulos de salidas discretas 1746-OA16 código que corresponde a un módulo de 16 salidas digitales de triak en un rango de voltaje de 100 a 120 Volts.

Figura 34. Configuración Salidas discretas en el Programa Logic500

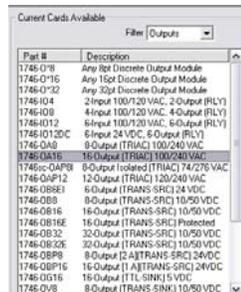


Figura 35. Configuración salidas analógicas en el Programa

Logic500

Part #	Description
1746-NI8	Analog 8 Channel Input - Class 1
1746-NI8	Analog 8 Channel Input - Class 3
1746-cc-NI8u	Analog 8 Ch. Universal
1746-NI16i	Analog 16 Ch. Current Input - Class 1
1746-NI16i	Analog 16 Ch. Current Input - Class 3
1746-NI16v	Analog 16 Ch. Voltage Input - Class 1
1746-NI16v	Analog 16 Ch. Voltage Input - Class 3
1746-NI04i	Analog 2 Ch. In/2 Ch. Current Out
1746-NI04v	Analog 2 Ch. In/2 Ch. Voltage Out
1746-NO4i	Analog 4 Ch. Current Output
1746-NO4v	Analog 4 Ch. Voltage Output
1746-NO8i	Analog 8 Ch. Current Output - Class 1
1746-NO8i	Analog 8 Ch. Current Output - Class 3
1746-NO8v	Analog 8 Ch. Voltage Output - Class 1
1746-NO8v	Analog 8 Ch. Voltage Output - Class 3
1746-NR4	Analog 4 Ch. RTD/Resistance Input
1746-NR8	Analog 8 Ch. RTD - Class 1
1746-NR8	Analog 8 Ch. RTD - Class 3
1746-NT4	Analog 4 Ch. Thermocouple Input
1746-NT8	Analog 8 Ch. Thermocouple Input
	Other -- Requires I/O Card Type ID

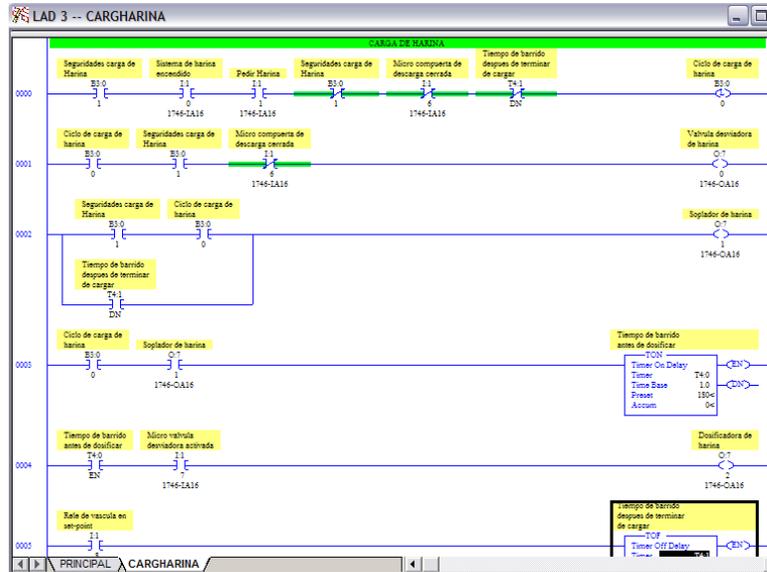
4.7.2. Software

4.7.2.1. Control de pasaje de harina

Para este fin se utilizan indicadores digitales los cuales poseen preactuadores para garantizar un peso exacto y salidas de rolo para indicar al procesador que el peso requerido a sido alcanzado.

Se le da indicación de arranque de pesado por medio de I:1/1 esta indicación enciende el ciclo de pesado controlado por B3:0/0, se activa la válvula desviadora de harina O:7/0, también se arranca el soplador del sistema O:7/1 para realizar el barrido del sistema durante 3 minutos controlados por un TON T4:0, una vez terminado este tiempo se enciende el dosificador de harina O:7/2 con lo que comienza el llenado de la tolva, cuando esta llega al peso requerido se envía una señal al SLC por medio de I:1/8, esto cierra la válvula y detiene la dosificación de harina, el soplador queda encendido para realizar un barrido final del sistema por 5 minutos controlados con un TOF T4:1, después de terminado este tiempo se apaga el soplador con lo que termina el ciclo de carga.

Figura 36. Control de pesaje de harina

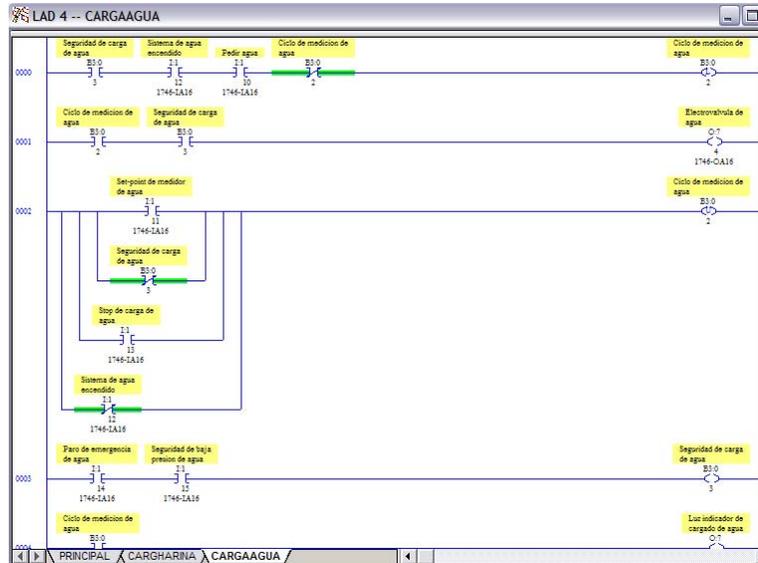


4.7.2.2. Control de flujo de agua

Se utilizan medidores de flujo *Blue White* con sensor tipo paletas.

Se da la indicación de arranque por medio de I:1/10 esta indicación enciende el ciclo de carga de agua controlado por B3:0/2, este abre la electroválvula de paso de agua O:7/4, el medidor toma datos de la cantidad de agua que pasa por su medidor, al llegar a la cantidad requerida se envía una señal por medio de I:1/11 acción que cierra la electroválvula de agua, resetea el contador por medio de O:7/6 y da por terminado el ciclo de carga de agua.

Figura 37. Control de flujo de agua

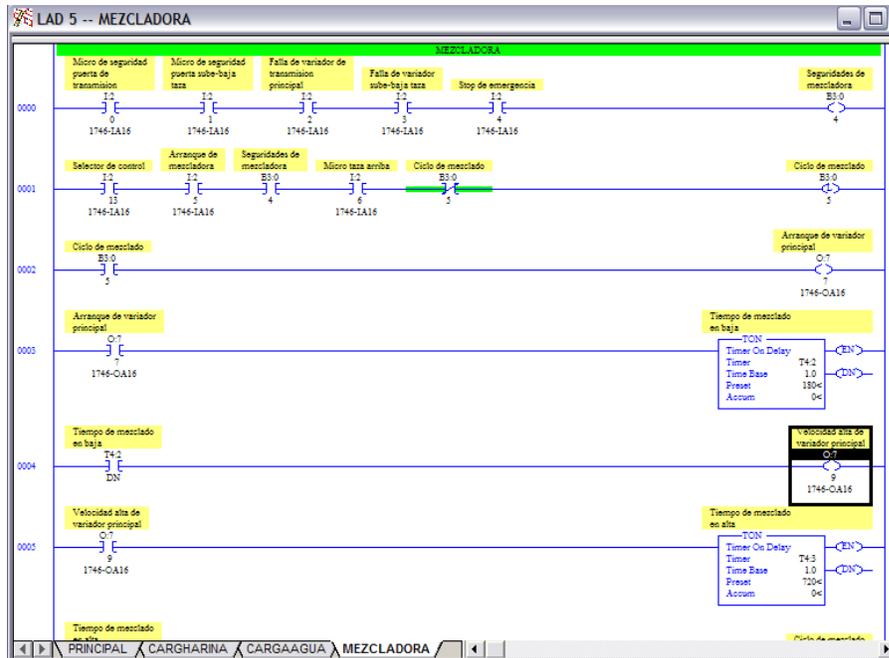


4.7.2.3. Ciclo de mezcladora

Se establece el tiempo de mezclado en bajas revoluciones controlado por medio de T4:2 y un tiempo de mezclado en altas revoluciones controlado por T4:3.

Se le da señal de arranque por medio de I:2/5 enciende el ciclo de mezclado el cual queda habilitado por medio de B3:0/4, este manda a arrancar el variador del motor principal de la mezcladora por medio de O:7/7 y empieza a contar el tiempo en baja de T4:2 el cual esta predefinido en 3 minutos cuando este tiempo se cumple se cambia la velocidad de variador por medio de O:7/9 y empieza a contar el tiempo de mezclado en alta T4:3 predefinido en 12 minutos, al concluir este tiempo se deshabilita B3:0/4 y se detiene el variador principal.

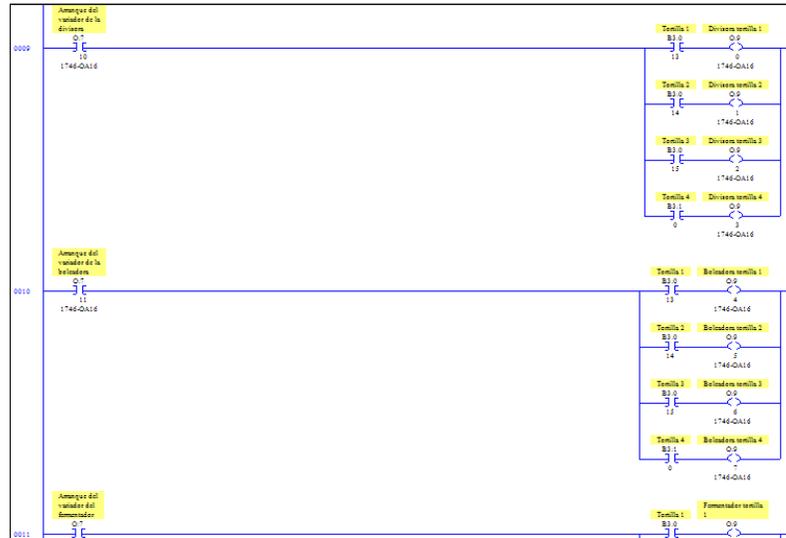
Figura 38. Control de ciclo de mezcladora



4.7.2.4. Ciclo de Maquinado

En este proceso se incluyen tres equipos, la divisora, la boleadora y el fermentador los cuales deben de estar sincronizados para cada tipo de producto que se ha de procesar, además deben de ser arrancados en secuencia para evitar desperdicios de masa innecesarios, se asigna el bit B3:0/13 para controlar los parámetros de la tortilla 1, B3:0/14 para controlar los parámetros la tortilla 2, B3:0/15 para controlar los parámetros de la tortilla 3 y B3:1/0 para controlar los parámetros de la tortilla 4. Por ejemplo cuando e Bit B3:0/14 esta activado, la velocidad de la divisora esta definida por O:9/1, la de la boleadora por O:9/5 y la del fermentador por O:9/9, con esto se logra que para cada producto se tenga la sincronización adecuada de velocidades.

Figura 39. Control de tamaño de tortilla

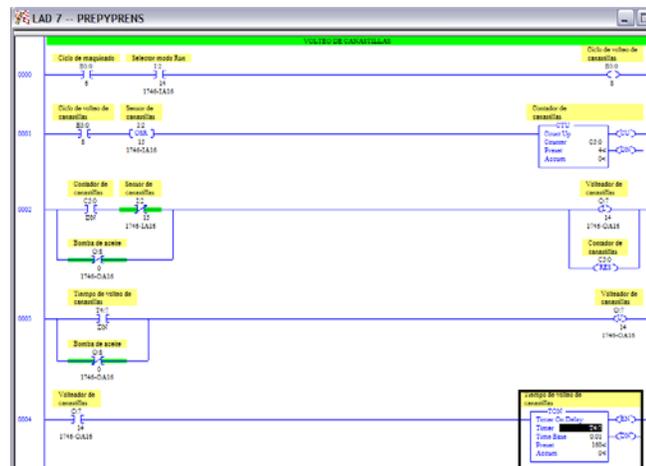


Se toma la señal de la entrada I:2/13 como selector de control de todo el sistema, cuando esta presente se puede arrancar la boleadora por medio de I:2/7 que da una señal al variador de la misma por medio de O:7/11, una vez presente esta se puede arrancar la divisora por medio del pulsador I:2/11, esto arranca el variador de divisora O:7/10 para realizar el ajuste de peso inicial, después ya es posible realizar el arranque del variador del fermentador por medio del pulsador I:2/9 y la señal al variador por medio de O:7/12. En este proceso también se incluye el motor de un harinador y el accionamiento de un vibrador O:10/14 para desalojar los excesos de harina del sistema de maquinado.

4.7.2.5.1. Ciclo de canastillas

Se tiene un sensor de canastillas I:2/15 el cual manda una señal al contador C5:0 en el cual esta predefinido el número de canastillas que debe de dejar pasar antes de extraer el volteador por medio de O:7/14, este permanecerá fuera por un tiempo definido por T4:7.

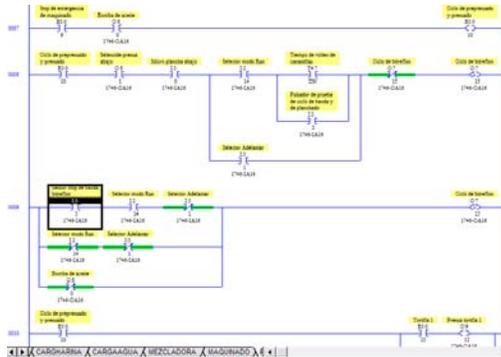
Figura 42. Control del ciclo canastillas



4.7.2.5.2. Ciclo de banda

Se tiene como condición que la bomba de aceite este funcionando O:8/0 y que la plancha no sen encuentre en la parte inferior, esto se detecta por medio de I:3/0, el sistema debe de estar en modo Run I:2/14 y que el tiempo de volteo de canastillas ciclo de volteo de castillas T4:7 haya concluido, una vez cubiertas estas condiciones arranca la banda con O:7/15 para colocar las bolitas de masa debajo de la prensa, la banda para cuando el sensor I:3/3 detecta el final del tramo de plancha.

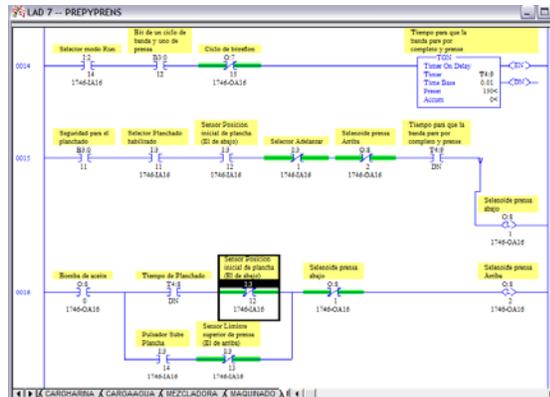
Figura 43. Control del ciclo de banda



4.7.2.5.3. Ciclo de plancha

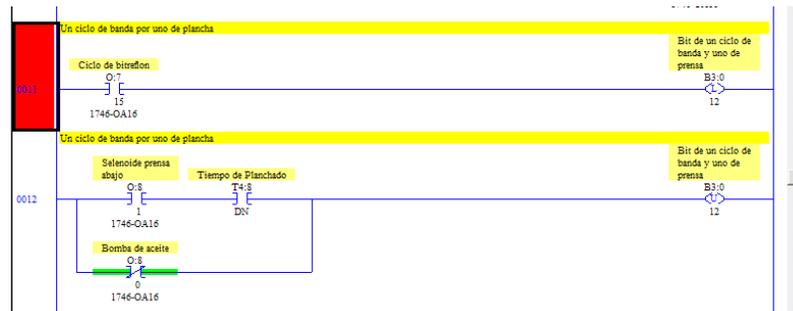
Se verifica que el pistón este en posición superior de inicio de planchado I:3/12, que el ciclo de planchado este habilitado por medio del selector I:3/11, una vez cubiertas estas condiciones se espera a que el ciclo de banda termine y que esta haya parado por completo, esto se realiza con un tiempo T4:9, cuando este concluye inicia el ciclo de prensado de bolitas, se acciona la selenoide de prensa abajo O:8/1, cuando el pistón llega a la parte inferior se activa el sensor I:3/0 el cual inicia con el conteo del tiempo de planchado controlado con T4:8, al terminar este tiempo se desconecta la selenoide de prensa abajo y se conecta la selenoide de prensa arriba O:8/2, al llegar a la posición superior de inicio de planchado detecta I:3/12 con lo que concluye el ciclo de plancha.

Figura 44. Control del ciclo de plancha



Se tiene una seguridad que permite solo un ciclo de planchado por uno de prensa, esta definida por un el bit B3:0/12, el cual se activa cuando se da un ciclo de banda en O:7/15 y desactiva cuando el tiempo de planchado T4:8 termina,

Figura 45. Control de la seguridad del ciclo de plancha



4.7.2.6. Control de horno y enfriador

Se da una señal de arranque del horno por medio de I:3/15, esta arranca el variador del horno O:8/4, esta señal habilita el sistema con control de ignición del horno O:8/5 además de permitir el arranque de la banda del enfriador I:4/1, esta señal habilita el variador del mismo O:8/6 y el arranque de la mesa giratoria al final del túnel O:8/7.

Figura 46. Control de horno y enfriador

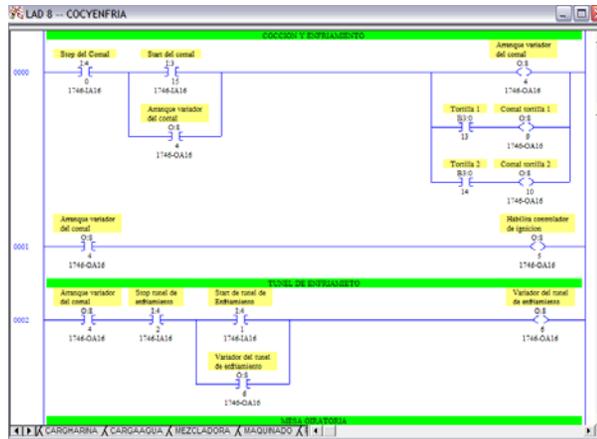


Figura 47. Horno



4.7.2.7. Control de temperatura

Se cuenta con una tarjeta analógica de entradas de termopares para poder realizar la toma de datos de temperatura del las planchas superior e inferior de la prensa, la temperatura interna del comal y de la temperatura del túnel frío.

Se utilizan termopares tipo J para realizar este tipo de medición.

Se habilitan los cuatro canales con que cuenta la tarjeta, se configura cada canal para que mida con termopares tipo J, que de salida en unidades de ingeniería y en grados centígrados.

Figura 48. Control de lazo cerrado

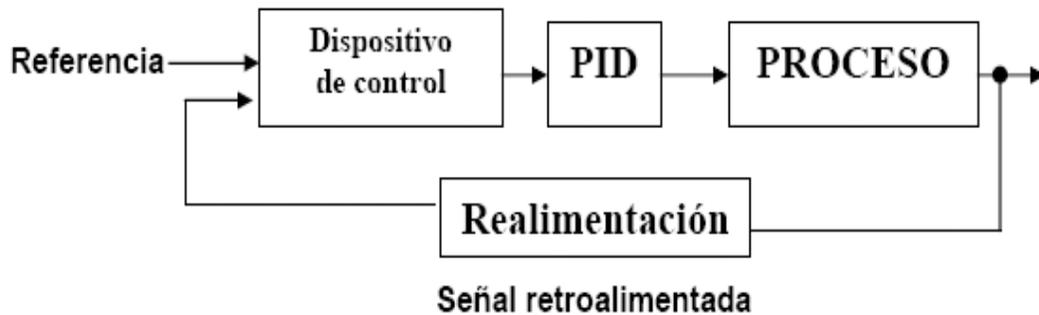
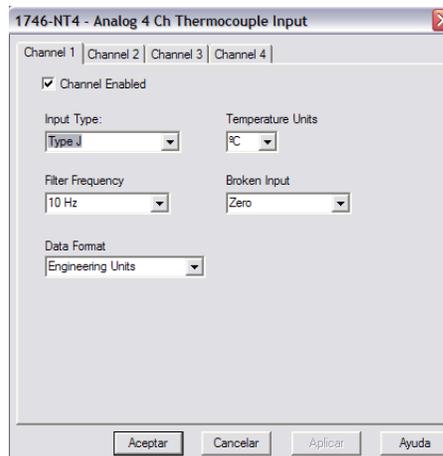


Figura 49. Habilitación de canal de medición módulo de termopares



Una vez habilitadas las entradas se procede a colocar un controlador PID para el control de la temperatura del comal N7:46, con la señal de la variable de proceso I:5.2 y salida a un registro N7:71, esta señal es escalada para producir una señal de 4 a 20 mA y es colocada en la salida analógica de corriente O:10.2 que controla un motor modulante Honeywell

Figura 50. Motor modulante y boquillas de quemador del Horno

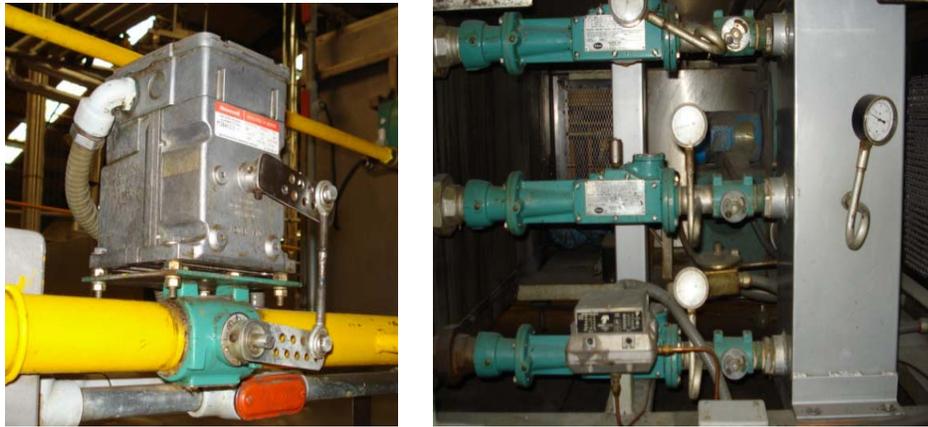
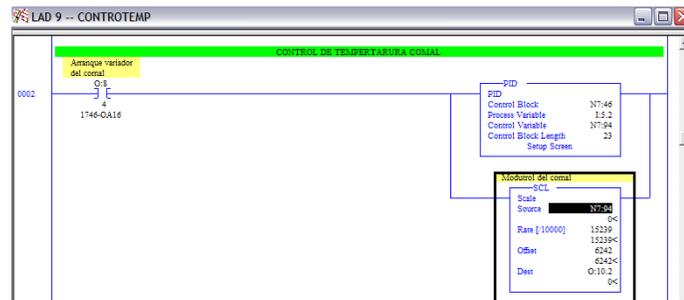
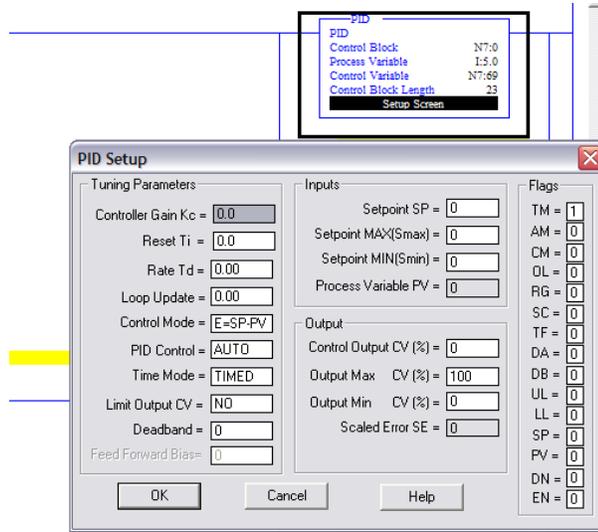


Figura 51. Control de temperatura de comal con PID



El bloque de control es un archivo que almacena los datos requeridos para operar la instrucción del PID. La longitud de archivo se fija a 23 palabras y se debe introducir como dirección de archivo de entero. La configuración del bloque debe de realizarse para cada instrucción en particular según las condiciones de proceso que estas controlan, los parámetros pueden ser visualizados y modificados en la pantalla de configuración del PID que se muestra a continuación.

Figura 52. Configuración de PID



En esta pantalla se encuentran :

Valores de sintonización:

La ganancia proporcional (Kc): esta debe de ajustarse con valores entre 0.1 a 25.5 La regla general es establecer esta ganancia a la mitad del valor necesario para causar que la salida oscile cuando los términos tiempo integral y derivativo estén en cero.

El tiempo integral o restablecimiento (Ti): este debe ajustarse entre 0.1 a 25.5 minutos por repetición. La regla general es establecer el tiempo de restablecimiento para que sea igual al período natural medido en la calibración de ganancia de arriba. Debe de tomarse en cuenta que el valor 1 añadirá el término integral mínimo posible en la ecuación PID.

Tiempo derivativo o Régimen (Td): este debe de ajustarse entre 0.01 a 2.55 minutos. La regla general es establecer este valor a 1/8 del tiempo integral de arriba.

Actualización del lazo o Loop Update: este es el intervalo de tiempo entre los cálculos PID. La entrada es en intervalos de 0.01 segundo. La regla general es introducir un tiempo de actualización del lazo cinco a diez veces más rápido que el período natural de la carga (determinado poniendo los parámetros tiempo integral y tiempo derivativo en cero y luego incrementando la ganancia hasta que la salida comience a oscilar). En el modo STI, este valor debe ser igual al valor de intervalo de tiempo STI de S:30. El rango válido es 1 a 2.55 segundos.

El control (CM): este puede ser colocado con valores $E=SP-PV$ y $E=PV-SP$.

La acción directa ($E=PV-SP$) causa que la salida CV incremente cuando la salida PV es mayor que el punto de ajuste SP (por ejemplo, una aplicación de enfriamiento). La acción inversa ($E=SP-PV$) causa que la salida CV incremente cuando la salida PV sea menor que el punto de ajuste SP (por ejemplo, una aplicación de calefacción)

Control de PID: este puede ser colocado en modo automático o modo manual. En modo automático indica que el PID controla la salida. Y en modo manual indica que el usuario establece el valor de salida. El límite de salida también se aplica en el modo manual.

El modo de control de salida (TM): este puede ser colocado en modo temporizado y STI. El modo temporizado indica que el PID actualiza su salida al régimen especificado en el parámetro de actualización del lazo. El modo temporizado, el tiempo de escán de su procesador debe ser un mínimo de diez veces más rápido que el tiempo de actualización del lazo para evitar inexactitudes o perturbaciones. El modo STI indica que el PID actualiza su salida cada vez que se escanea. Cuando selecciona STI, la instrucción PID debe ser programada en una subrutina de interrupción STI, y la rutina STI debe

tener un intervalo de tiempo igual al ajuste del parámetro de actualización del lazo.

Las entradas:

El Punto de ajuste o Set Point (SP): es el punto de control o valor deseado de la variable del proceso Sin escala, este parámetro puede tomar valores que están entre 0–16383, En caso contrario el rango estaría entre el Setpoint Min (Smin) y el Setpoint Max (Smax)

Punto de ajuste máximo o Setpoint Max (Smax) : cuando el punto de ajuste o Setpoint debe ser leído en unidades de ingeniería, entonces este parámetro corresponde al valor del punto de ajuste en unidades de ingeniería cuando la entrada de control es 16383. El rango válido es ± 16383 a +16383.

Punto de ajuste mínimo o Setpoint Min (Smin) : cuando el punto de ajuste o Setpoint debe ser leído en unidades de ingeniería, este parámetro corresponde al valor del punto de ajuste en unidades de ingeniería cuando la entrada de control es cero. El rango válido es ± 16383 a +16383

La variable de proceso (PV) : este es un parámetro que no puede ser ajustado solamente se puede visualizar el valor de la entrada analógica que mide la variable del proceso a controlar. Sin escala, el rango de este valor es 0–16383. Si no, el rango es de Setpoint Min (Smin) a Setpoint Max (Smax)

Las salidas:

Salida de control CV (%): muestra la salida CV real de 0 a 16383 en términos de porcentaje El rango es 0 a 100%, si se selecciona el modo manual se puede cambiar la salida CV% y el cambio se aplicará a CV.

Salida de control mínima o Min (CV%): este es el valor en % que tomará como mínimo la salida del controlador, si el valor de la variable de salida cae hasta este valor se activará la alarma de límite bajo (LL)

Salida de control máxima o Max (CV%): este es el valor en % que tomará como máximo la salida del controlador, si el valor de la variable de salida llega hasta este valor se activará la alarma de límite bajo (UL)

Error con escala: se usa para visualización solamente. Este es el error de escala según es seleccionado por el parámetro de modo de control. No es más que el valor de Setpoint menos la variable de proceso o al contrario según sea la función de la instrucción.

La columna derecha de la pantalla anterior muestra varios indicadores asociados con la instrucción PID. La sección siguiente describe estos indicadores:

El bit de modo de tiempo (TM): especifica el modo PID. Se establece cuando el modo TEMPORIZADO está en efecto. Se pone a cero cuando el modo STI está en efecto. Este bit se puede establecer o poner a cero por medio de instrucciones en su programa de escalera.

El bit manual/automático (AM): especifica la operación automática cuando se pone a cero y la operación manual cuando se establece.

Este bit puede ser establecido o poner a cero por medio de instrucciones en su programa de escalera.

El bit de modo de control (CM): se pone a cero si el control es $E=SP-PV$. Se establece si el control es $E=PV-SP$. Este bit se puede establecer o poner a cero por medio de instrucciones en su programa de escalera.

El bit de límite de salida habilitado (OL): se establece cuando ha seleccionado limitar la variable de control usando la tecla de función [F4]. Este bit se puede establecer o poner a cero por medio de instrucciones en su programa de escalera.

El bit de mejoramiento de restablecimiento y rango de ganancia (RG):
este bit causa que el valor de restablecimiento de minuto/repetición y el multiplicador de ganancia sean mejorados por un factor de 10 (multiplicador de restablecimiento de .01 y multiplicador de ganancia de .01).

El indicador de punto de ajuste de escala (SC): se pone a cero cuando se especifican los valores de escala del punto de ajuste.

El tiempo de actualización del lazo demasiado rápido (TF): está establecido por el algoritmo PID si el tiempo de actualización del lazo que ha especificado no puede ser realizado por el programa en cuestión (debido a límites de tiempo de escán).

Bit de acción de derivativa (DA): cuando está establecido, este bit causa que el cálculo de derivativa sea evaluado en el error en vez del PIV. Cuando se pone a cero, este bit permite que el cálculo de derivativa sea evaluado de la misma manera que la instrucción PID.

Bit (DB): se establece cuando la variable de proceso se encuentra dentro del rango de banda muerta de intersección con 0.

La alarma de salida, límite superior (UL): se establece cuando el CV de salida de control calculado excede el límite CV superior.

La alarma de salida, límite inferior (LL): se establece cuando el CV de salida de control calculado es menor que el límite CV inferior.

El punto de ajuste fuera de rango (SP): se establece cuando el punto de ajuste excede el valor con escala máximo o es menor que el valor con escala mínimo.

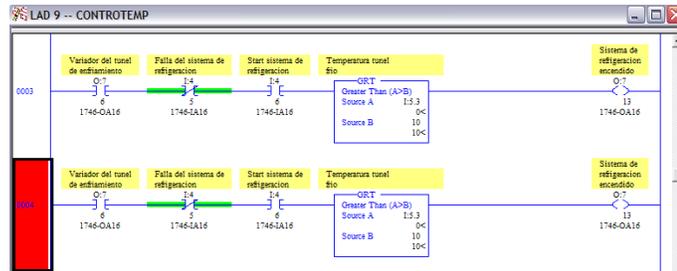
La variable de proceso fuera de rango (PV): se establece cuando la variable de proceso sin escala (o sin procesar) excede 16838 ó es menor que cero.

El PID efectuado (DN): se establece donde el algoritmo PID se calcula. Se calcula al régimen de actualización del lazo.

El PID habilitado (EN): se establece mientras que el renglón de la instrucción PID se habilita.

Para el control de la plancha superior e inferior no se cuenta con un control de modulación, por lo que no es necesario un controlador PID, en este caso se toma la señal de la variable de proceso I:5.0 para la plancha superior y la señal de proceso I:5.1 para la plancha inferior y se comparan para obtener salidas discretas en O:8/14 y O:8/15 para controlar la conexión y desconexión de las resistencias de las planchas.

Figura 53. Control temperatura de plancha superior y plancha inferior



De la misma forma para el control de temperatura en el enfriador se analiza la señal del termopar I:5.3 por medio de un comparador el cual activa el sistema de refrigeración O:8/13 mientras que el valor de I:5.3 cuando este no se encuentre en el valor deseado control *on – off*.

Figura 54. Control temperatura de enfriador

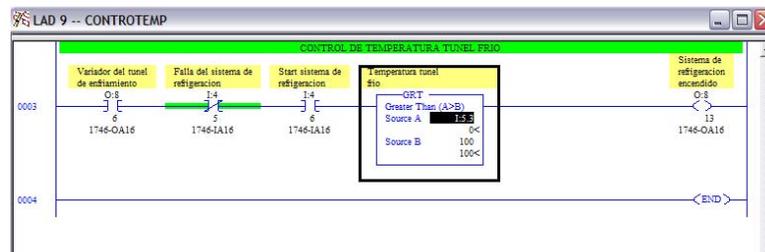


Figura 55. Diagrama de control de temperatura

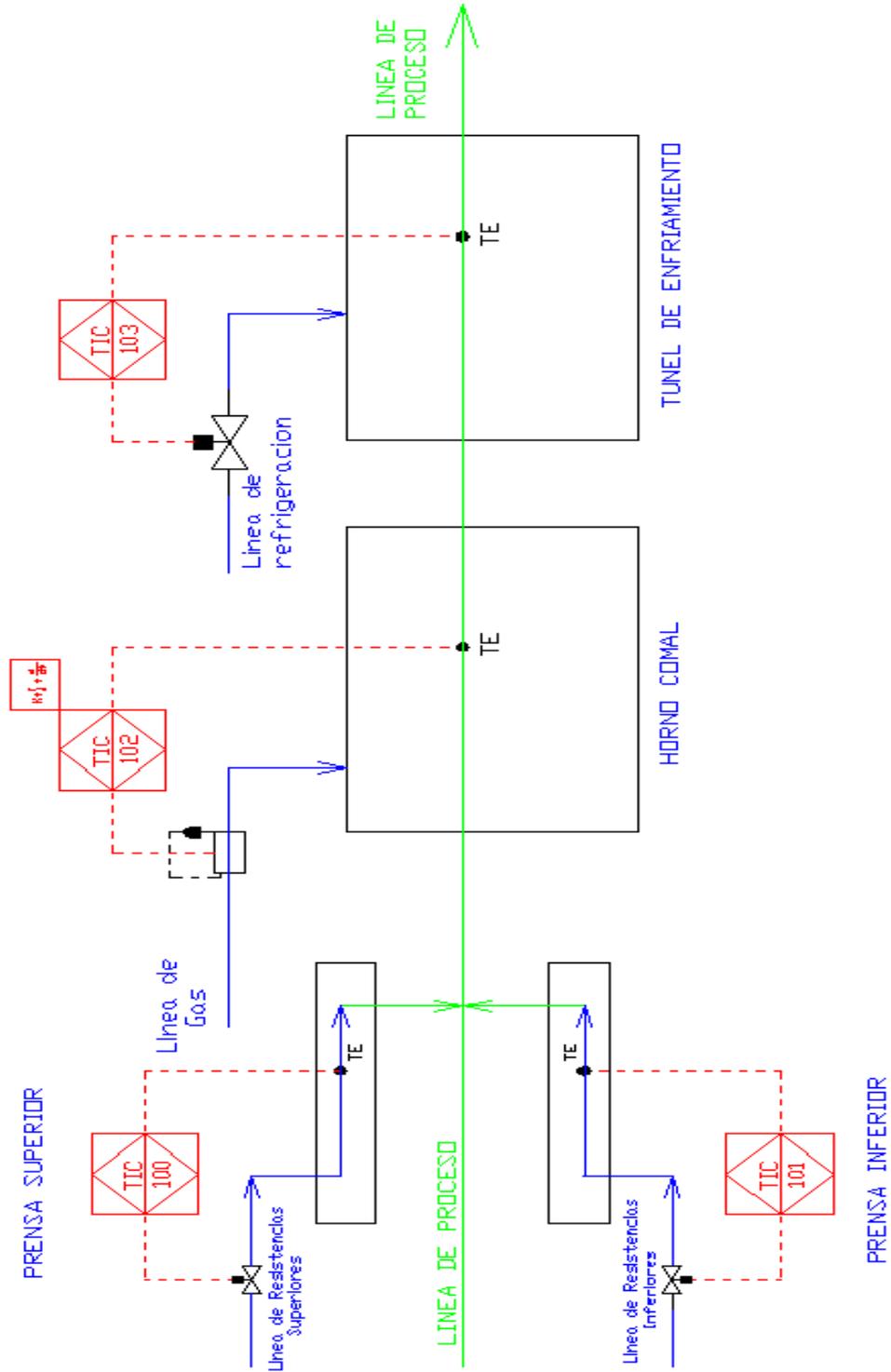


Figura 56. Nomenclatura de diagramas de control

NOMENCLATURA	Símbolo	
	PLC	Instrumento Discreto
Instrumento montado localmente		
Instrumento montado en panel con acceso para el operador		
Instrumento montado en panel sin acceso para el operador		
Instrumento montado detras Del panel		
Valvula con posiclonador		
Valvula		
Valvula Selenolde		
Selenolde		
Señal Electrica	-----	
Linea de proceso	—————	
Elemento de temperatura		

CONCLUSIONES

1. Se ha diseñado una forma de controlar automáticamente un proceso de producción de tortillas de harina tomando en cuenta los factores principales que afectan este proceso que permitirá un control de proceso importante para mantener la estabilidad del mismo y que a la vez sea flexible para poder hacer cambios rápidos en el proceso además de la diversificación de los productos.
2. Para la realización del control automático se tomaron las siguientes variables de proceso:
 - Peso: controlar la cantidad de harina que será ingresada a la mezcladora
 - Flujo: controlar la cantidad de agua que se agrega a la mezcla de los ingredientes.
 - Presión: Para establecer la presión a la que serán prensadas las tortillas en la prensa hidráulica.
 - Temperatura: Se tomaran datos de temperatura para poder controlar la temperatura de las planchas de las prensas, la temperatura del horno donde se cocerán las tortillas y la temperatura de la cámara de enfriamiento.
3. Para la realización de del control automático de una línea de tortillas de harina se utilizaran:
 - Celda de carga para la toma de peso
 - Sensor de flujo de paletas para la medición del flujo de agua.
 - Termopar tipo J para la toma de temperaturas
 - Sensor tipo inductivo para detectar posición.
 - Controlador lógico marca Allen Bradley SLC500 5/04

- Módulo de entradas digitales para SLC500 de 120 volts AC marca Allen Bradley
- Módulo de entradas analógicas de termopar para SLC500 marca Allen Bradley
- Módulos de salidas digitales de triac de 120volts AC para SLC500
- Módulo de salidas analógicas de corriente para SLC500

Como elementos finales de control se utilizaran los siguientes:

- Actuadores lineales neumáticos controlados por electroválvulas
 - Actuadores lineales hidráulicos controlados por electroválvulas
 - Motores de jaula de ardilla controlados por variadores de frecuencia
 - Servomotores para controlar la posición de las válvulas de gas
4. El uso del PID en control de temperatura de hornos es esencial para mantener el proceso de cocimiento de las tortillas de harina con condiciones estables, con esto se mantiene la calidad del producto y se garantiza que las piezas están cocinadas por completo.
 5. La acción proporcional, integral y derivativa trabajan juntas para proveer un medio eficiente y exacto de control automático, la acción proporcional responde a la magnitud del error, la acción integral responde a la duración del error y la acción derivativa a la velocidad del error.
 6. Para la sintonización del lazo de control del horno de cocción se debe de graficar la variable de entrada y la variable de salida y tomar como base que la ganancia proporcional (K_c) debe de ser la mitad del valor necesario para causar que la salida de control oscile, que el término integral (T_i) debe se ser igual al período de oscilación de la salida y el término derivativo (T_d) debe de establecerse con un valor de $1/8$ del tiempo integral.

RECOMENDACIONES

1. Cuando se inserta una instrucción de PID en un programa de SLC 500 no se deben escribir direcciones de bloque de control con otras instrucciones del programa. Si se vuelve a usar un bloque de datos que ya fue asignado anteriormente para otro uso, se debe corregir y poner todos los valores de estos en cero. Crear un archivo de datos único para la configuración del bloque de PID, evitará el reuso de direcciones del bloque de control del PID y que este genere errores de aplicación.
2. Se deben de hacer verificaciones de los equipos de campo tales como: sensores y elementos finales de control cada 6 meses como mantenimiento preventivo, para evitar problemas en el proceso y en la sintonización del PID.
3. Una vez sintonizado el lazo de control del PID no es aconsejable realizar ajustes a los parámetros del mismo sin un buen análisis de las posibles repercusiones que este cause.
4. Se recomienda realizar una copia de seguridad del programa cada seis meses para tener un respaldo por cualquier contingencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Allen Bradley, Manual de instalacion y operación de SLC 500. Publicación 1747-6.2ES-1996
2. Allen Bradley, Manual de referencia del Juego de instrucciones de SLC 500 y Micrologic. Publicación 1747-6.2ES-1996
3. Benjamín C Kuo, Sistemas de Control Automático, Séptima edición, Prentince Hall Hispanoamericana, S.A.
4. Cotreras Jacinto, German. Diseño de Automatización de rotativa de impresión Goss Utilizando la Plataforma Control Logic. . Tesis de Ing. Electrónica. USAC, Facultad de Ingeniería. 2005. 181pp.
5. Mendoza Bautista, Israel Ebenezer. Diseño de Automatización del Proceso de Cocimiento de Productos alimenticios en la industria utilizando Equipos de Cocción (Marmitas). Tesis de Ing. Electrónica. USAC, Facultad de Ingeniería. 2004.

Referencia electrónica

6. Allen Bradley, www.ab.com/catalogs, 2002
7. Allen Bradley, www.ab.com/drives, 2004.
8. Rockwell Software www.software.rockwell.com. 2003
9. Honeywell company, www.honeywell.com, 2005